



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Grado en Ingeniería Mecánica**

# **ESTUDIO CFD DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN UNA VIVIENDA CON RIESGO DE POBREZA ENERGÉTICA**



## **Memoria**

<b>Autor:</b>	Gerard Muñoz Estoquera
<b>Director:</b>	Alfredo Guardo Zabaleta
<b>Convocatoria:</b>	Junio 2019



## Resum

Amb la col·laboració de OasiUrbà, una ONG que estudia la vulnerabilitat energètica dels habitatges a Barcelona per tal de dur a terme reformes amb l'objectiu de millorar les condicions de vida; s'ha començat un estudi d'avaluació CFD d'un habitatge en el marc del pròxim projecte d'actuacions que utilitzarà l'ONG. Per tant, en el present estudi s'ha creat la geometria, s'ha realitzat l'estudi de convergència de la malla tant per el pis com per l'edifici i s'han buscat les condicions de contorn correctes per la simulació. Així mateix, aquesta exploració té l'objectiu de facilitar la futura investigació que es durà a terme per les reformes previstes en l'habitatge, de manera que amb l'ajuda d'aquest model es podrà corroborar la verdadera eficàcia de les reformes previstes per l'ONG.

## Resumen

En colaboración con OasiUrbà, una ONG que estudia la vulnerabilidad energética de viviendas en Barcelona para llevar a cabo reformas con el objetivo de mejorar las condiciones de vida; se ha empezado un estudio de evaluación CFD de una vivienda en el marco del próximo proyecto de actuaciones que realizará la ONG.

Por consiguiente, en el presente estudio se ha creado la geometría, se ha realizado el estudio de convergencia de la malla tanto para el piso como para el edificio y se han buscado las condiciones de contorno correctas para la simulación. Así mismo, esta exploración tiene el objetivo de facilitar la futura investigación que se realizará sobre las reformas previstas en la vivienda, de manera que con la ayuda de este modelo se podrá corroborar la verdadera eficacia de las reformas previstas por la ONG.

## **Abstract**

In cooperation with OasiUrbà, a NGO that studies the energy vulnerability of dwelling in Barcelona to carry out reforms with the aim of improving living conditions. A CFD evaluation study of a house has been started in the framework of the next project of actions to be carried out by the NGO.

Accordingly, in the present study the geometry has been created, the mesh convergence study has been carried out for both the floor and the building, the correct contour conditions have been sought for the simulation. Moreover, this exploration has the objective of facilitating the future research that will be carried out on the reforms planned in the dwelling, so that with the help of this model it will be possible to corroborate the true effectiveness of the reforms planned by the NGO.

## Agradecimientos

Agradecer a mis padres no solo el apoyo incondicional durante estos años de la carrera, sino el apoyo desde el momento en el que nací. Gracias a vosotros puedo decir orgullosos quienes son mis padres.

Agradecimientos a Alfredo Guardo Zabaleta por darme la oportunidad de realizar este trabajo, el cual ha sido muy gratificante, agradecerle la paciencia y la constancia a lo largo de estos meses y por encima de todo agradecerle la predisposición a ayudarme.

Agradecer a mi pareja, Marina Pérez, por dar un nuevo aire a mi vida, ayudarme ante las adversidades así como compartir conmigo los momentos de alegría.

# Índice

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Origen del trabajo .....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Alcance/limitaciones .....	2
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1.Eficiencia energética .....	3
2.2.Confort térmico.....	4
2.2.1. ASPECTOS QUE INFLUYEN EN EL CONFORT TERMICO.....	5
2.2.2. FACTORES AMBIENTALES.....	6
2.2.3. EVALUACIÓN DEL BIENESTAR TERMICO.....	8
2.3. CALOR .....	9
2.4. FLUJO DE CALOR. ....	10
2.4.1. Conducción .....	11
2.4.2. Convección.....	13
2.4.3. Radicación.....	15
2.5. RESISTENCIAS TERMICAS EN PAREDES.....	20
2.6. INERCIA TERMICA.....	23
2.7. PUENTE TERMICOS.....	24
2.8. AISLAMIENTO TÉRMICO .....	25
2.9 VENTILACION .....	26
2.9.1 INTRODUCCIÓN ALAIRE .....	26
2.9.2 OBJETIVOS DE LA VENTILACION.....	27
2.9.3 CAUSAS DEL DETERIORO DELAIRE.....	27
2.9.4. TIPOS DE VENTILACION.....	28
2.9.5 NORMATIVA CAUDAL VENTILACIÓN MÍNIMO.....	29
2.10. NORMATIVA.....	30
2.10.1. CTE .....	30

2.10.2 LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA.....	32
2.11. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) .....	34
2.11.1. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS AL CFD .....	35
2.11.2. ETAPAS BÁSICAS DE UNA SIMULACIÓN CFD.....	38
<b>3. . METODOLOGÍA</b> .....	<b>40</b>
3.1. ELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	40
3.2. PRESENTACIÓN VIVIENDA DE ESTUDIO.....	41
3.2.1. EXTERIOR VIVIENDA.....	41
3.2.2 INTERIOR VIVIENDA .....	43
3.3. REALIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA .....	46
3.4. REALIZACIÓN DE LA MALLA.....	48
3.5. ESTABLECER LAS CONDICIONES DE CONTOURNO .....	51
3.6. METODOLOGÍA ESTUDIO DE CONVERGENCIA DEL PISO COMPLETO.....	54
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
4.1.RESULTADOS ESTUDIO MALLA PARA LA CÁMARA DE AIRE .....	59
4.2. RESULTADO ESTUDIO CONVERGENCIA DEL AIRE DE LA VIVIENDA .....	65
<b>5. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL</b> .....	<b>67</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>69</b>
6.1.CONCLUSIONES A NIVEL DEL TRABAJO .....	69
6.2. CONCLUSIONES A NIVEL PERSONAL.....	70
<b>PRESUPUESTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>75</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Origen del trabajo

El presente proyecto se ha realizado en colaboración con el departamento de Mecánica de Fluidos de la EEBE y con la ONG Oasiurbà, con sede en la calle Sant Ramón en la ciudad de Barcelona.

Oasiurbà es una ONG que nace de la colaboración entre varias entidades sin ánimo de lucro, es un grupo formado en su mayoría por arquitectos, junto con abogados y trabajadores sociales. Se dedican a llevar a cabo proyectos para mejorar las condiciones de las viviendas situadas en el barrio del Raval (Barcelona), viviendas en riesgo de vulnerabilidad, exclusión social o pobreza energética. Son familias que viven en condiciones precarias, algunas incluso compartiendo pisos con desconocidos porque no se pueden permitir nada más. Esta asociación se dedica a la puesta en marcha de los proyectos en colaboración con el ayuntamiento para mejorar las condiciones de vida en viviendas antiguas y que se encuentran en pésimas condiciones.

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el de analizar y asentar las bases para las futuras actuaciones que se lleven a cabo en un bloque de viviendas ubicado en el Raval.

Al no tratarse del primer proyecto de esta ONG no pretendemos cambiar su manera de trabajar sino que pretendemos dar una ayuda extra a las tareas que desempeñan, tanto a nivel de aportación de ideas como a nivel de evaluación de estas ideas. Dado que la gran mayoría de las personas que forman los grupos de trabajo para las actuaciones son arquitectos, el hecho de tener un estudiante de ingeniería en el grupo de trabajo ayudará a tener otro punto de vista diferente para los problemas que se puedan plantear.

El primer objetivo será el de la realización de la vista de planta en 2D, para luego realizar la geometría 3D de la vivienda, junto con el patio de luces. Esta geometría será la que luego usaremos para todas las simulaciones.

El siguiente objetivo será analizar primero el comportamiento del aire contenido en la cámara de aire, para determinar a través de un estudio de convergencia de malla cual será el tipo de malla a usar para obtener unos resultados correctos.

Una vez realizado el estudio de convergencia de la cámara de aire, el siguiente paso será mallar el piso de estudio completo y ver que se puede realizar correctamente la simulación, ya que al ser una geometría formada por muchos subconjuntos, muchas veces en las primeras simulaciones da problemas.

Para finalizar se realizará el estudio de convergencia de la malla para determinar cual será la mejor densidad de malla para el aire contenido en el interior de la vivienda, así como el aire del patio de luces.

### **1.3. Alcance/limitaciones**

En este proyecto abarcaremos las etapas que van desde el arranque del proyecto (1) la aportación en la lluvia de ideas de cara a posibles actuaciones que se pueden realizar en las viviendas (2), el análisis de la convergencia de la malla para la vivienda de estudio

El punto 1 consiste en la realización de entrevistas individuales con cada una de las viviendas del bloque de pisos que están interesados en participar en el proyecto para explicar en qué consiste el proyecto y que nos cuenten un poco las condiciones en las que viven y cuáles son los problemas más destacados para ellos, además de programar una o dos visitas a la vivienda para corroborar las informaciones dadas por los inquilinos y ver nosotros de primera mano las deficiencias que presenta cada una de las viviendas.

Para el punto 2, se tratará de aplicar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de estos años con la realización del Grado en Ingeniería Mecánica en un marco práctico, analizando cuales se serían las mejores alternativas para conseguir un confort térmico adecuado en el interior de las viviendas, especialmente en lo que se refiere a elementos pasivos. Esto es debido a que el caso de estudio es un edificio donde habitan familias con riesgo de exclusión social y con un bajo nivel adquisitivo, por lo que el uso de elementos activos como calefacción durante el invierno o aire acondicionado en verano tiene un uso ínfimo o nulo en algunos pisos.

Para el punto 3 nos hemos decantado por el uso del software ANSYS este programa nos permite hacer una simulación muy precisa de las condiciones del edificio en cuanto a eficiencia térmica y ventilación para su posterior estudio. Para conseguir estos resultados deberemos realizar todo un seguido de pasos que se detallaran más adelante. Además también hemos necesitado del software Solidworks, dado que como paso previo al análisis primero teníamos que dibujar en 3D el edificio en cuestión y por los conocimientos adquiridos durante estos años este era el software de diseño en 3D que mejor manejo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Eficiencia energética**

Generalmente, la eficiencia energética pretende mantener el servicio que presta, reduciendo el consumo de energía necesario, objetivo que se intenta lograr reduciendo las pérdidas que se producen durante en el proceso. La eficiencia sigue tres principios básicos: Reducción de la demanda energética, aumento de la eficiencia energética de las instalaciones y aumentar el uso de las energías renovables disponibles. Dado que para el caso de estudio no incumbe el uso de energías renovables, nos centraremos en los dos primeros puntos.

En una vivienda este concepto hace referencia a la capacidad de conservar el calor en el invierno o mantener una temperatura correcta en verano.

Con una mejora en la eficiencia energética conseguiremos un mayor bienestar en la vivienda mientras que reducimos la factura energética, a raíz de esto presentaremos algunos ejemplos de mejora de la eficiencia energética para ciertos edificios:

- Realizar un uso eficiente de los sistemas relacionados con la energía como sistemas de calefacción, aire acondicionado, ventilación,... o renovándolos.
- Mejorando el aislamiento y eliminando los puentes térmicos.
- Aprovechamiento de la luz natural y la radiación solar.

Para entender mejor en que consiste la eficiencia energética y las posibles acciones en post de mejorarla, debemos introducir algunos puntos y características que nos ayudarán a entender mejor el concepto de eficiencia energética y todo lo que la envuelve.

## 2.2. Confort térmico

El confort térmico se define como: una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico.

El confort humano es una sensación en la que intervienen una gran cantidad de aspectos de las personas como la edad, el género, la actividad realizada, la vestimenta, etc.

Pueden diferenciarse en dos grupos los aspectos determinantes en el confort de los usuarios en un recinto: factores y parámetros. Los primeros son creados por la situación, mientras que los segundos son modificables a través de cambios en el recinto de estudio.

FACTORES	Ambientales	Exteriores	Temperatura del Aire
			Temperatura Radiante
			Humedad Relativa
			Velocidad del Aire
	Personales	Fisiológicos y Contributivos	Sexo
			Edad
			Peso
			Tasa de Metabolismo Basal
			Muscular (Nivel de Actividad)
			Estado de Salud
			Intercambio de Calor por Ingestión de Bebidas y Alimentos
			Historial Térmico Inmediato
			Mediato
			Tiempo de Permanencia
		Socioculturales y Psicológicos	Variabilidad Temporal y Espacial de los Estímulos Físicos Ambientales
			Tipo de Vestimenta
			Expectativas de Confort
			Contacto Visual con el Exterior
PARÁMETROS	Ambientales	Interiores	Temperatura del Aire
			Temperatura Radiante
			Humedad Relativa
			Velocidad del Aire
	Arquitectónicos	Adaptabilidad del Espacio	Movilidad del Ocupante dentro del Espacio.
			Modificación de Elementos y Dispositivos de Control Ambiental.

Ilustración 1 Factores y parámetros que determinan el confort térmico

## 2.2.1. ASPECTOS QUE INFLUYEN EN EL CONFORT TERMICO

Diferenciamos en dos grupos los factores determinantes en el confort de los usuarios en un recinto: los factores personales y los ambientales

### 2.2.1.1. FACTORES PERSONALES

Los aspectos personales juegan un papel muy importante a la hora de sentirse cómodo en un lugar. Sólo el metabolismo de una persona hace que se generen aproximadamente entre 65 y 80 W, en función de la edad, el sexo y el tamaño de la persona.

A su vez, el confort térmico tiene una importante componente sociocultural, por lo que no son suficientes únicamente los parámetros físicos para medir el confort térmico de un lugar. El único parámetro común entre todas las personas es que su cuerpo intentará mantener una temperatura aproximada de 37°C.

### 2.2.1.2. EL METABOLISMO Y LA VESTIMENTA

El metabolismo podemos medirlo con una unidad llamada Met (1 Met = 58,15 W/m<sup>2</sup> de superficie del cuerpo). El rango de valores que puede alcanzar el metabolismo de una persona es amplio, en función de las actividades que realice:

Actividad	Producción de energía metabólica	
	W /m <sup>2</sup>	met
Tumbado	46	0,8
Sentado, relajado	58	1,0
Actividad ligera, sentado (oficina, hogar, escuela, laboratorio)	70	1,2
Actividad ligera, de pie (compras, laboratorio, industria ligera)	93	1,6
Actividad media, de pie (vendedor, tareas domésticas, trabajo con máquinas)	116	2,0
Marcha en llano:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Il·lustració 2 Producció de energia metabòlica segons la activitat realitzada

A la energía generada por una persona debido a su metabolismo cabe integrar la incidencia de la vestimenta que ésta utiliza en ese momento.

La ropa reduce la pérdida de calor del cuerpo y se clasifica según su valor en cuanto al aislamiento.

La unidad normalmente usada para medir el aislamiento de ropa es el Clo, aunque también se utiliza el  $m^2C/W$  ( $1Clo = 0,155 m^2C/W$ ).

La escala Clo se ha diseñado para que una persona desnuda tenga un valor de 0,0 Clo, alguien vestido con un traje típico de negocio tenga un valor de 1 Clo y alguien con abrigo 1.5 Clo.

## 2.2.2. FACTORES AMBIENTALES

Los parámetros a tener en cuenta a nivel físico ambiental son la temperatura del aire, la temperatura media radiante, la velocidad del aire y la humedad, tal y como se ha mostrado al hablar de zonas de confort. Todos estos parámetros deben tenerse en cuenta al realizar un buen diseño de climatización de aire en un local. Los principales se indican en los apartados siguientes: temperatura, humedad relativa y calidad y velocidad del aire interior.

### 2.2.2.1. LA TEMPERATURA

Por lo general lo más habitual es hablar de la temperatura operativa o resultante, que combina los efectos de la temperatura del aire y los de la temperatura media radiante.

$$T_{op} = \frac{T_A + T_R}{2}$$

Donde:

$T_{op}$  = Temperatura operativa ( $^{\circ}C$ ).

$T_A$  = Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ ). Se define como la temperatura que se mide a la altura de la cabeza y a una distancia mínima de 1,5 m de las paredes de locales cerrados.

$T_{MR}$  = Temperatura radiante de las superficies del local ( $^{\circ}C$ ). La temperatura media radiante es la temperatura de las superficies interiores del local que percibe el cuerpo humano.

En general se suele ser similar a la del aire interior, pero si hay alguna superficie relativamente caliente (Techos en verano) o fría (Ventanas en invierno), conviene calcular la  $T_{rm}$  ponderada, según el área ( $A_n$ ) y la temperatura ( $T_n$ ) de cada una de las (n) paredes, suelo y techo.

$$T_{rm} = \Sigma (T_n \cdot A_n) / \Sigma A_n$$

En España, la temperatura operativa media que se considera de confort está comprendida entre 23 y 26°C cuando no tomamos en cuenta la ventilación natural. Pese a ello, el RITE [30] recomienda no superar los 25°C de temperatura operativa.

#### **2.2.2.2. HUMEDAD RELATIVA**

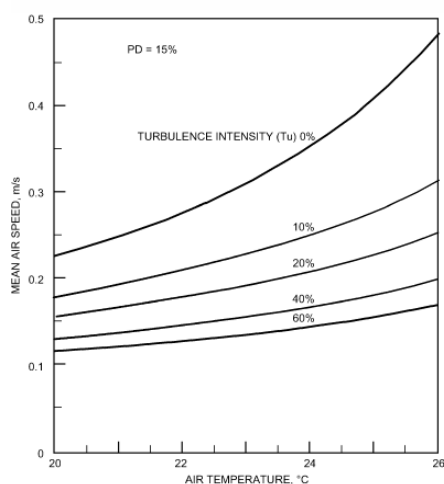
La humedad relativa nos permitirá indicar en un diagrama psicrométrico las condiciones térmicas en el interior de un local.

Definimos la humedad relativa como la cantidad de vapor de agua que se halla en el aire en proporción a la cantidad máxima que podría contener (aire saturado = 100% de humedad). Cuanto mayor es la temperatura del aire, más humedad retendrá en comparación con un aire más frío. Una baja HR permite la evaporación del sudor y por tanto el descenso de temperatura superficial de los ocupantes.

Generalmente se recomienda que las humedades relativas deben mantenerse en el rango del 30-70%.

#### **2.2.2.3. VELOCIDAD DEL AIRE**

Las corrientes de aire son una de las quejas más comunes en ambientes climatizados, debido a que el ser humano es muy sensible a la variación de velocidades en el aire, especialmente en las partes no cubiertas por la vestimenta. Es por ello importante calcular el porcentaje de personas descontentas por corrientes donde se relaciona la temperatura del aire, la velocidad de éste y la desviación estándar de esa velocidad. Se recomienda garantizar un ambiente confortable para el 85% de los ocupantes. Para ello puede utilizarse la siguiente figura.



Il·lustració 3 Velocidad media del aire permitida para garantizar un 15% de insatisfechos en caso de actividades ligeras

### 2.2.3. EVALUACIÓN DEL BIENESTAR TERMICO

Cuantificar el confort es un concepto complicado ya que depende de parámetros subjetivos y personales. Uno de los modelos teóricos más conocidos es el del PMV-PPD donde PMV son las siglas de voto medio previsto y PPD las del porcentaje de personas insatisfechas ante ese voto. Este modelo teórico estacionario, formulado por Fanger, establece una relación a partir de la sensación térmica que tendría un grupo de personas expuestas a un cierto ambiente, entrando en juego la actividad (producción de energía metabólica) y la vestimenta (resistencia térmica) y considerando la temperatura del aire, la temperatura media de radiación, la velocidad relativa del aire y la presión parcial del vapor de agua.

El PMV asigna un voto de confort positivo o negativo en una escala de siete, mediante una ecuación empírica ante dicho ambiente. A partir de él puede calcularse el PPD.

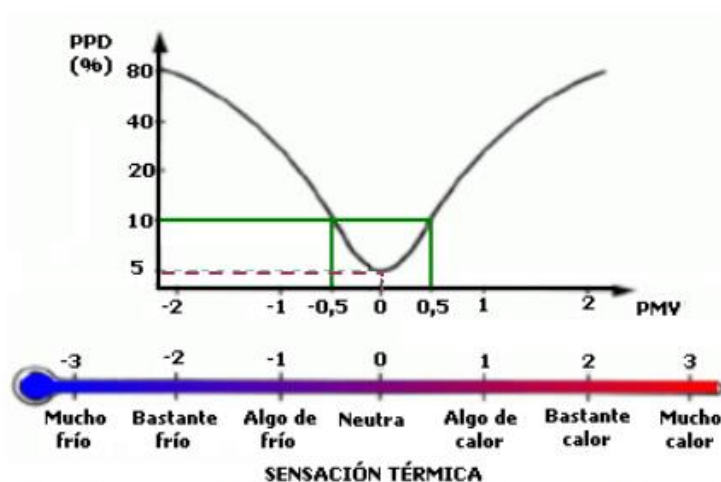
Los índice PMV (siglas en inglés de *Predicted Mean Vote*) refleja el valor medio de los votos (puntuaciones) sobre la sensación térmica general que emitirá un grupo numeroso de personas en caso de que estuviese expuesta a las mismas condiciones térmicas, ambientales, realizasen la misma actividad física y llevasen una ropa similar.

El índice PPD (siglas en inglés de *Predicted Percentage of Dissatisfied*) está relacionado con el índice PMV y representa el porcentaje de personas insatisfechas térmicamente para un valor determinado de PMV.

El índice PMV puede alcanzar un valor numérico comprendido entre +3 y -3, valor que predecirá una sensación térmica de distinta intensidad de calor (en caso de ser positivo), distinta intensidad



de frío (en caso de ser negativo) o la neutralidad teórica (si fuese cero). Para cada valor de PMV, el índice PPD predecirá el % de personas insatisfechas térmicamente dentro de un grupo de muchas personas.



**Figura 2 – Porcentaje previsto de insatisfechos (PPD) en relación con el Voto medio previsto (PMV)<sup>1</sup>.**

*Il·lustració 4 Porcentaje previsto de insatisfechos (PPD) en relación con el Voto medio previsto (PMV)*

Como podemos observar en la imagen, incluso aunque el índice PMV sea 0, lo que correspondería a una sensación térmica neutra (ni frío ni calor), hay un PPD=5%; es decir, un 5% de las personas siente el ambiente térmico no confortable. De ello se puede extraer la siguiente conclusión:

Por lo tanto, no es posible especificar ni conseguir unas condiciones termo higrométricas que satisfagan a todas las personas debido a sus características individuales. Lo que sí es posible conseguir es que dichas condiciones satisfagan a un gran porcentaje de personas.

## 2.3. CALOR

El calor (representado con la letra Q) es la energía transferida de un sistema a otro debido en general a una diferencia de temperatura entre ellos. El calor que absorbe o cede un sistema termodinámico depende normalmente del tipo de transformación que ha experimentado dicho sistema.

Es un tipo de energía que se produce por la vibración de moléculas y que provoca la subida de las temperaturas, dilatación de cuerpos, la fundición de sólidos y la evaporación de líquidos

Conviene destacar que los cuerpos no almacenan calor sino energía interna. El calor es por tanto la transferencia de parte de dicha energía interna de un sistema a otro, con la condición de que ambos estén a diferentes temperaturas. Su unidad en el sistema internacional son los Julios (J). La

expresión que relaciona la cantidad de calor que intercambia una masa  $m$  de cierta sustancia con la variación de temperatura  $\Delta T$  que experimenta es:

$$Q = m * c * \Delta T$$

Donde  $c$  es el calor específico de la sustancia.

El calor específico (o capacidad calorífica específica) es la energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de 1 kg de masa. Sus unidades en el Sistema Internacional son J/kg·K.

## 2.4. FLUJO DE CALOR.

El flujo de calor se define como la cantidad de calor por unidad de tiempo que pasa a través de una superficie. Viene definido por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{Q}{t}$$

Siendo:

$\phi$ : Flujo de calor [W]

$Q$ : Cantidad de calor [J]

$t$ : Tiempo [s]

El flujo de calor se produce cuando existe un incremento de temperaturas entre los diferentes cuerpos, transfiriéndose desde el cuerpo con temperatura más alta al cuerpo con temperatura más baja hasta llegar al equilibrio térmico.

El equilibrio térmico es un estado en el que dos cuerpos en contacto mecánico, o separados por una superficie conductora, igualan sus temperaturas inicialmente dispares, debido a la irradiación de calor de uno hacia el otro hasta alcanzar un balance. Una vez alcanzado este balance, si no hay pérdidas de calor hacia otros objetos, en adelante mantendrán un equilibrio térmico, es decir, una temperatura constante.

Es importante diferenciar si esta transmisión de calor se produce en régimen estacionario o transitorio. Cuando hablamos de régimen estacionario el flujo y la temperatura en cualquier punto son independientes, mientras que en régimen transitorio el flujo y la temperatura varía con el tiempo, por lo que existe variación en la energía interna del sistema.

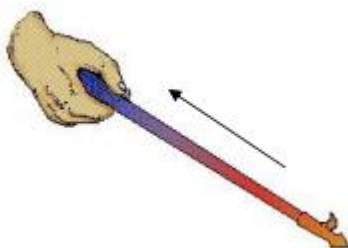
En nuestra situación de estudio, estaríamos en el caso de régimen transitorio ya que ni la temperatura en el exterior ni la interior son constantes, además de prescindir de la capacidad de conservación de calor de los materiales en forma de la envolvente.

Existen tres mecanismos de transmisión de calor que están presentes en nuestro día a día: Conducción, convección y radiación.

Se dará una descripción breve de cada uno de estos para familiarizarnos con los mecanismos básicos de transferencia de calor.

### 2.4.1. Conducción

Este mecanismo consiste en la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo o entre dos cuerpos perfectamente en contacto que se encuentran a diferente temperatura sin que se produzca transferencia de materia entre ellos, ya que el calor fluirá del objeto de mayor temperatura hacia el de menor buscando alcanzar el equilibrio térmico



*Ilustración 5 Representación conducción en barra metálica*

Este proceso es típico de los sólidos y se considera consecuencia de la agitación térmica, la cual tiene diferentes orígenes:

- 1- Para los sólidos no metálicos en los fonones, cuantos de energía de las ondas elásticas o de vibración de las redes interatómicas.
- 2- Para los sólidos metálicos por el transporte de energía por parte de los electrones libres.
- 3- Para los gases y líquidos que se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. Para este caso es imposible separar el proceso de conducción del proceso de convección propio de los fluidos.

La conducción sigue la ley de Fourier de la conducción de calor

$$\dot{Q} = -k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ (W)}$$

A partir de esta fórmula podemos observar que la tasa de conducción de calor ( $\dot{Q}$ ) por una capa de espesor constante ( $\Delta x$ ) es proporcional a la diferencia de temperatura en la capa ( $\Delta T$ ) y el área ( $A$ ) normal a la dirección de transferencia de calor. Donde  $K$  es la conductividad térmica del material, la cual es una medida de la capacidad del material para conducir calor que nos permite clasificar los materiales según su capacidad de conducir el calor.

Para el caso límite de  $\Delta x \rightarrow 0$ , la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial:

$$q^* = -k * \frac{\delta T}{\delta n}$$

Donde:

$\frac{\delta T}{\delta n}$ : Gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama. T-x

El signo menos indica que el flujo de calor va en dirección opuesta al gradiente.

Esta forma diferencial se conoce la ley de Fourier de la conducción de calor, e indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en la misma dirección.

Los parámetros relacionados con la conducción térmica en materiales son la conductividad térmica y la resistencia térmica.

La resistencia respecto a los flujos de calor que atraviesan un material se calcula en función de la conductividad térmica ( $k$ ): cantidad de energía que atraviesa una superficie de  $1\text{m}^2$  y  $1\text{m}$  de espesor cuando las temperaturas a ambos lados difieren en  $1^\circ\text{C}$ . Sus unidades en SI son el  $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$  que equivale a  $0.86\text{ kcal}/\text{m}^\circ\text{C}$ .

La resistencia térmica ( $R$ ) de un material da idea de la dificultad que encuentra el calor a la hora de transmitirse por el interior del material. A través de un medio homogéneo la resistencia térmica se relaciona directamente con el grosor del material de la forma:

$$R = \frac{e}{k}$$

Donde,

R: Resistencia térmica  $\left[\frac{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}}{\text{W}}\right]$

e: Grosor del material [m]

k: Conductividad térmica  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$

### 2.4.2. Convección

Mecanismo de transmisión de calor que se da entre un sólido y un fluido que lo envuelve.

La transmisión de calor por convección tiene lugar entre líquidos y gases. Esta se produce cuando las partes más calientes de un fluido ascienden hacia las zonas más frías, generando de esta manera una circulación continua del fluido (corriente de convección) y transmitiendo así el calor hacia las zonas frías. Los líquidos y gases, al aumentar de temperatura disminuyen de densidad, provocando la ascensión. El hueco dejado por el fluido caliente lo ocupa el fluido más frío (de mayor densidad).

Clasificación según el tipo de convección:

- 1- Libre o natural: El movimiento del fluido es provocado por la diferencia de densidades asociada a la variación espacial de la temperatura en presencia de un campo gravitacional, esto sucede porque el fluido en contacto con una frontera caliente incrementa su temperatura a lo largo de la interfaz común, lo que hace que el fluido disminuya su densidad. Como resultado aparecen en el fluido fuerzas de flotación que hacen que las partes más calientes asciendan. El fluido desplazado es reemplazado por fluido circundante más frío, formándose así un patrón circulatorio auto sostenido denominado corrientes o celdas de convección.
- 2- Forzada: El proceso seguido es el mismo que para la convección libre con la diferencia que el movimiento del fluido está producido por un elemento impulsor externo, es decir, el fluido es forzado a fluir sobre una superficie por medios externos como por ejemplo ventiladores, bomba o el viento.
- 3- Con cambio de fase: En los dos casos de convección anteriores, los fluidos que intervienen siempre permanecen en la misma fase a pesar de los cambios de temperatura que experimentan, sin embargo, en determinadas sustancias es posible que debido a los cambios de temperatura que tienen lugar durante el proceso se produzca una transición de fase con un intercambio de calor, que hay que tener en cuenta la hora de calcular el flujo de energía en la superficie. Este fenómeno tiene lugar por ejemplo en procesos de convección asociados a la condensación o a la ebullición, proceso en el que se producen intercambios de calor muy importantes, incluso más intensos que en la convección forzada.

La convección de calor se describe por la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = h * A * (T_s - T_f) (W)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de convección.

$A$ : Es la superficie.

$T_s$ : Es la temperatura en la superficie.

$T_f$ : Es la temperatura en el fluido.

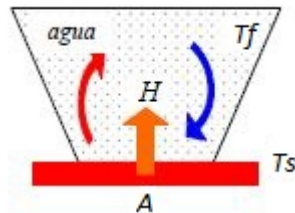


Ilustración 6 Flujo de calor convección

El flujo de calor por convección es positivo ( $Q > 0$ ) si el calor se transfiere desde la superficie de área ( $A$ ) al fluido ( $T_s > T_f$ ) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ( $T_f < T_s$ ).

A partir de la fórmula anterior obtenemos la tasa de flujo de calor por unidad de área entre la superficie del sólido y el fluido que lo envuelve, que es de la forma:

$$q^* = h * (T_s - T_f)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) no es una propiedad del fluido, es un parámetro determinado de forma experimental cuyo valor depende de todas las variables que afectan a la convección, como por ejemplo la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad volumétrica del fluido y se expresan en  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .

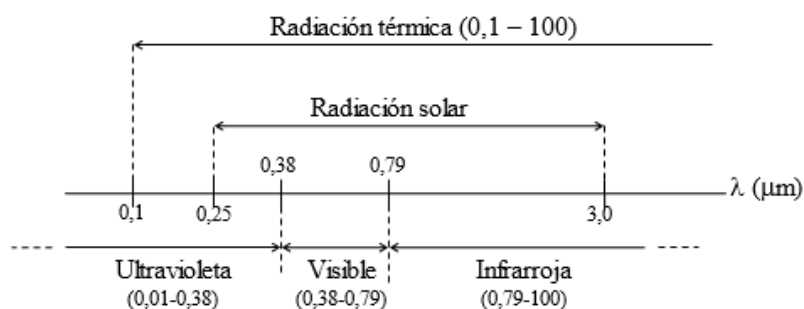
### 2.4.3. Radiación

La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, las cuales no necesitan un medio material para propagarse. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación es la más rápida ya que se lleva a cabo a la velocidad de la luz.

Para los estudios de transferencia de calor, el interés se halla en la radiación térmica, que es la forma de radiación que emiten los cuerpos debido a su temperatura y que difiere de las otras formas de radiación electromagnética como los rayos X, gamma, etc. Todos los cuerpos con temperatura superior al cero absoluto emiten radiación térmica.

Denominamos radiación térmica a la radiación electromagnética emitida por un cuerpo asociada a su temperatura absoluta, que se sitúa entre  $0,1$  y  $100 \mu m$ , y que por tanto, incluye totalmente en su interior la parte visible del espectro electromagnético.

La radiación solar, después de atravesar la atmosfera, está comprendida entre  $0,25 \mu m$  y  $3 \mu m$  aproximadamente.



Il·lustració 7 Espectro radiación térmica y solar

La radiación se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. La más importante es la radiación Solar, el valor de la cual llega a la tierra condicionada por factores de distinta naturaleza:

- 1-Factores astronómicos como la posición relativa Sol-Tierra y las coordenadas geográficas del lugar considerado (latitud y longitud))
- 2-Factores climáticos causados por las características de la atmosfera terrestre que provoca alteraciones a causa de fenómenos de reflexión, refracción, absorción y difusión por los distintos gases atmosféricos.

Por todo esto tenemos que la radiación solar que llega a una superficie se divide en tres partes:

- Radiación directa: Formada por los rayos procedentes del sol directamente o Radicación solar incidente. Es esa radiación que ha encontrado cualquier obstáculo al que ha entregado toda o parte de su energía
- Radicación solar difusa: También recibe el nombre de radicación indirecta. La radiación solar difusa representa la porción de radiación solar que golpea al menos una partícula de gases atmosférica al cambiar el ángulo de incidencia y que, sin embargo, alcanza el suelo porque está dirigida hacia él. EJ.



*Ilustración 8 Representación radiación difusa*

- Radiación solar reflejada: La radiación solar reflejada es la parte de la radiación solar incidente reflejada desde la superficie de la tierra debido al efecto albedo. El albedo es el cociente de reflexión  $c$ , el valor del cual generalmente están entre 0 y 1 o se expresan como un porcentaje. Está dada por la relación entre la energía radiante reflejada desde una superficie con respecto a la energía incidente. El albedo depende de la superficie sobre la que se refleja, por ejemplo en la nieve es de 0,9, mientras que el del mar es de 0,1, en el suelo desnudo puede variar entre 0.15-0.25.



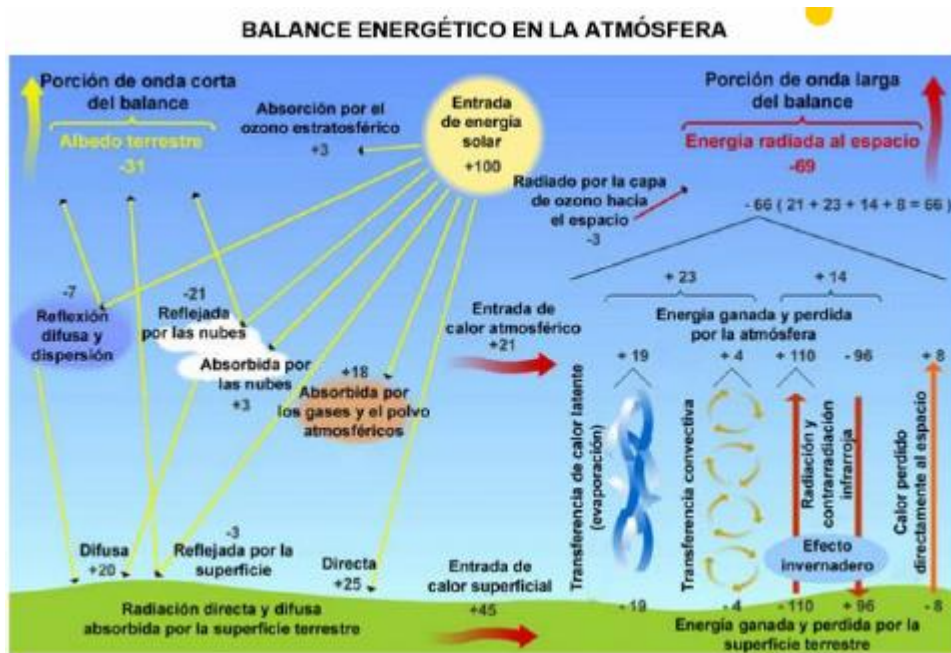


Ilustración 9 Balance energético en la atmósfera

Una vez la radiación llega a la superficie del cuerpo a analizar vemos que se comporta de distintas maneras según el tipo de material del cuerpo.

#### 2.4.4. Comportamiento radiación sobre un material

Después de deducir todas las pérdidas debidas a la reflexión y dispersión de la atmósfera y la superficie de la Tierra, la radiación solar incidente al chocar con un cuerpo sufre 3 fenómenos variables según la naturaleza del cuerpo

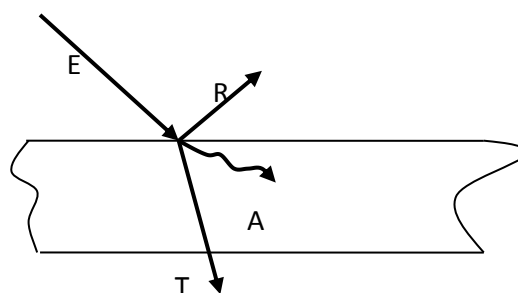


Ilustración 10 Dispersión energía radiante (E)

E: La energía radiante que choca con el cuerpo e absorbida (A), reflejada (R) y transmitida (T) en proporciones variables según la naturaleza del cuerpo.

La parte de energía radiante incidente absorbida por la superficie del cuerpo se transforma en un aumento de su energía interna (+AU) y por tanto en un aumento de su temperatura (AT). La absorción de radiación es un fenómeno superficie y no un fenómeno de volumen, de forma que en el interior del sólido no afecta la absorción. Sin embargo, el calor generado por la absorción puede fluir hacia el interior del sólido por conducción.

Según el principio de conservación de la energía:

$$E = A + R + T$$

Dividiendo esta expresión por la energía incidente (E):

$$1 = \frac{A}{E} + \frac{R}{E} + \frac{T}{E}$$

O bien:

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

Siendo:

$\alpha = \frac{A}{E}$  = fracción de la radiación que es absorbida = absorptividad.

$\rho = \frac{R}{E}$  = fracción de la radiación que se refleja = reflectividad.

$\tau = \frac{T}{E}$  = fracción de la radiación que se transmite = transmisividad.

La mayor parte de los sólidos con los que se trabaja en ingeniería y arquitectura son cuerpos opacos a la radiación, es decir, poseen una transmisividad tan baja que puede considerarse nula frente a la absorptividad y reflectividad.

La razón máxima de radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura T es expresada por la ley de Stefan-Boltzman.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{rec}^4) (W)$$

Donde:

$\sigma$ : Es la constante de Stefan-Boltzmann, que tiene un valor de  $5.67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 * K^4} \right]$ .

$A$ : Es el área de la superficie.

$T_s^4$ : Es la temperatura del Sol.

$T_{rec}^4$ : Es la temperatura recibida.

Esta fórmula sólo es válida para una superficie ideal llamada cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{rec}^4) (W)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Es la emisividad de la superficie, la cual se encuentra entre  $0 < \varepsilon < 1$ , medida de cuán próxima está una superficie de un cuerpo a la de un cuerpo negro, definido como un objeto ideal que absorbe toda la radiación y por tanto su emisividad ( $\varepsilon$ ) es igual a 1.

Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su absorptividad, la cual es la fracción de energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por esta. Como la emisividad, su valor está en el intervalo  $0 < \alpha < 1$ . Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él, es decir tiene un valor de 1 del mismo modo que para la emisión.

La ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la emisividad y la absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. La razón por la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de:

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha * \dot{Q}_{incidente} (W)$$

Para las superficies opacas, la parte de la radiación incidente no absorbida por la superficie es reflejada.

La diferencia entre las tasas de radiación emitida por la superficie y de radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la tasa de radiación absorbida es mayor que la de emisión de radiación, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De otro modo, se afirma que la superficie está perdiendo energía por radiación.

## 2.5. RESISTENCIAS TERMICAS EN PAREDES

Recuerde que la transferencia de calor en cierta dirección es impulsada por el gradiente de temperatura en esa dirección, por tanto no habrá transferencia de calor en la dirección en la que no se produce un cambio de temperatura. La superficie de una pared es casi isotérmica, es decir, las temperaturas en la parte superior e inferior de la superficie de una pared son casi la misma. Observamos que no hay transferencia de calor a través de la pared de la parte superior hacia abajo, o de izquierda a derecha, pero sí que hay una diferencia considerable de temperaturas entre la superficie interior y exterior de una pared, y por tanto, una transferencia de calor significativa en la dirección de la superficie interior a exterior o exterior a interior.

Para el cálculo de la transmisión deberemos calcular primero las resistencias térmicas del conjunto, unas ecuaciones análogas a la relación para el flujo de corriente eléctrica

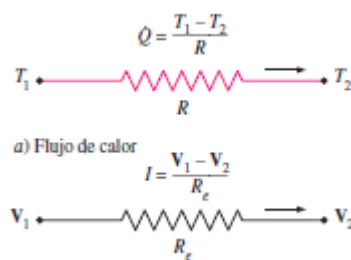


Ilustración 11 Imagen muestra analogía entre las dos ecuaciones

### Q CONDUCCION

Para una pared con  $T_1$  y  $T_2$  a temperatura constante la  $Q$  conducción se calcula como:

$$\dot{Q}_{cond.pared} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \text{ (W)}$$

De aquí vemos que la conducción de calor a través de una pared plana es proporcional a la conductividad térmica promedio, al área de la pared y a la diferencia de temperatura, pero es

inversamente proporcional al espesor de la pared. Asimismo una vez se cuenta con la razón de la conducción de calor, se puede determinar la temperatura  $T(x)$ .

Dicha fórmula se puede reacomodar para tener:

$$Q_{cond.pared} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} (W)$$

Donde,

$$R_{pared} = \frac{L}{k \cdot A} (^\circ C/W)$$

Es la resistencia térmica de la pared en contra de la conducción de calor o simplemente la resistencia a la conducción de la pared.

### Q CONVECCION

Consideramos ahora la transferencia de calor por convección de una superficie sólida de área  $A$  y temperatura  $T$  hacia un fluido en un punto suficientemente lejos de la superficie que será  $T_\infty$ , con un coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ . La ley de Newton del enfriamiento para la razón de transferencia de calor por convección se puede reacomodar para obtener:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{(T_s - T_\infty)}{R_{conv.}}$$

Donde

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A_s} (^\circ C/W)$$

Es la resistencia térmica de la superficie contra la convección de calor, o simplemente, la resistencia a la convección de la superficie.

## Q RADIACIÓN

Cuando la pared está rodeada por un gas, los efectos de radiación que hemos ignorado hasta ahora, pueden ser significativos y es posible que sea necesario controlarlos. La razón de la transferencia de calor por radiación entre una superficie de emisividad  $\varepsilon$  y área  $A$ , que está a la temperatura  $T_s$  y las superficies circundantes a la temperatura promedio  $T_{alred}$ , se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{alred}^4) = h_{rad} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{alred}) = \frac{T_s - T_{alred}}{R_{rad}} (W)$$

Donde

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A_s} (K/W)$$

Es la resistencia térmica de una superficie contra la radiación o bien la resistencia a la radiación y

$$h_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{A_s(T_s - T_{alred})} = \varepsilon \cdot \sigma (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s + T_{alred}) \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

Es el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Con las ecuaciones de la resistencia térmica para la conducción, la convección y la radiación, podemos analizar el comportamiento de una pared.

### 2.5.1. RESISTENCIA TERMICA TOTAL

La resistencia térmica total ( $R_t$ ) mide la oposición que muestra una pared a transmitir el calor, considerando su comportamiento ante la conducción en función de la resistencia térmica de cada una de los materiales que forman el cerramiento, así como el efecto de la convección de sus caras externas (exterior e interior) en contacto con los ambientes que lo rodean o el efecto de la radiación. El efecto de la convección se cuantifica mediante sus resistencias térmicas superficiales, que incluyen el efecto de la radiación

$$R_t = \frac{1}{h_e} + R_1 + R_2 + \frac{1}{h_i}$$

El inverso de esta resistencia térmica total se define como transmitancia térmica ( $U$ ) de unidades  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$ . Su significado es el de la cantidad de calor que pasa por  $1 m^2$  cuando las temperaturas a ambos lados difieren en  $1 ^\circ C$ .

Los valores  $h_i$  y  $h_e$  se calculan mediante la suma de los coeficientes de cambio que deban tenerse en cuenta en la cara exterior e interior del material (en función de los mecanismos de transmisión de calor que actuarán en cada uno de los dos lados.) Pese a que esos coeficientes de cambio dependen de las condiciones ambientales, suele tomarse como valor estándar  $h_i = 8 \frac{W}{m^2 * K}$  considerando que las superficies están en contacto con el fluido.

## 2.6. INERCIA TERMICA

La inercia térmica se define como la cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado Kelvin la temperatura de un metro cubico del elemento constructivo

Es una propiedad de los materiales para almacenar y conservar el calor, y como consecuencia, variar su temperatura en la misma cantidad de tiempo. Las viviendas con mayor inercia térmica mantendrán el calor o el frío mucho mejor.

La inercia térmica se determina según la capacidad térmica o capacidad calorífica de un material, que como hemos definido anteriormente es la cantidad de calor que almacena un material por unidad de masa del mismo, cuando su temperatura aumenta un grado centígrado, igualmente la misma cantidad de calor será desprendida cuando el material se enfríe un grado.

Para lograrlo, debe tener una conductividad alta para dejar penetrar el calor, y una densidad y calor específico muy alto para acumular el máximo de calor

$$I = \sqrt[2]{k * \rho * c} \left[ \frac{J}{m^2} * s^{\frac{1}{2}} * K \right]$$

$k$ : Conductividad térmica definida anteriormente.

$\rho$ : Densidad, masa por unidad de volumen de un material. Para una elevada inercia térmica, se recomiendan materiales con una densidad alta.

$c$ : Calor específico.

Los materiales pétreos, el granito y el hormigón tienen las mayores inercias térmicas, razón por lo que son tan empleados en la construcción de edificios.

Para que el calor que se gana en la superficie interior se transfiera como calor emitido hacia el interior de la vivienda se emplea cierto tiempo; en otras palabras existe un retraso que puede ser pequeño en construcciones de baja inercia térmica y mayor en construcciones de alta inercia térmica.

La inercia de la construcción es una de las medidas pasivas más importantes de cara a obtener confort térmico en verano, lo que ocurre cuando en un buen diseño las paredes con gran inercia térmica absorben las ganancias térmicas interiores durante el día y en la noche que es más fresca liberan el calor almacenado al ambiente, disminuyendo los calores extremos en el día. Además durante el invierno, se puede diseñar para emplear la capacidad de almacenar calor la cual permite aprovechar las ganancias térmicas gratuitas, como lo son las ganancias solares, restituyendo ese calor al interior durante la noche o en periodos en que no haya ganancias externas.

Según el empleo de la vivienda que usemos deberemos darle importancias distintas a la inercia térmica ya que no es lo mismo calentar una casa de fin de semana, la cual debería tener una baja inercia térmica ya que en invierno no lograríamos calentar la casa casi hasta el momento de irse, mientras que una vivienda de primera residencia debe tener una gran inercia térmica porque nos ayudara mejor a mantener la temperatura interior del inmueble.

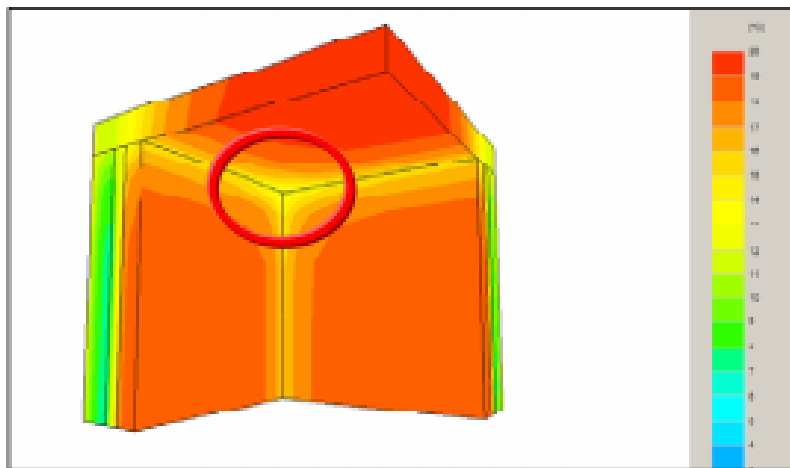
## 2.7. PUENTE TERMICOS

Un puente térmico es una zona de la envolvente de un edificio por donde se pueden producir fugas caloríficas. Estas fugas pueden ser producidas por muchos motivos: cambio en el espesor del cerramiento o materiales empleados, por la penetración de elementos constructivos con diferente conductividad, por la diferencia entre el área externa e interna del elemento.

Debido a esto nos encontramos con 3 tipos principales de puentes térmicos:

- Puente térmico puntual como por ejemplo puede ser un tornillo que atraviesa un elemento de madera desde un extremo hacia otro a lo largo de ese tornillo podría estar circulando el calor, pues el metal conduce mucho mejor el calor que la madera.
- Puente térmico lineal: El más habitual, Se trata de una zona de contacto entre dos materiales distintos. Por ejemplo el encuentro entre una ventana con la pared, dicho encuentro entre materiales no siempre están bien sellados y pueden facilitar que el calor escape o entre hacia el interior.
- Puente térmico zonal: Este lo encontramos cuando una fachada con cámara de aire tiene una zona en la que el aislamiento térmico se ha interrumpido o simplemente no se ha colocado.





*Il·lustració 121 Ejemplo de un puente lineal*

Los puentes térmicos afectan a la habitabilidad de los locales donde se encuentran de diferentes maneras, por un lado afectan al consumo energético del local o vivienda ya que son puntos térmicamente débiles por los que se pierde el calor en mayor cuantía. Por otro lado afectaran al bienestar de los ocupantes, ya que en las zonas donde se encuentran, al alcanzarse temperaturas superficiales más bajas que en las zonas normalmente aisladas, se incrementan las pérdidas del cuerpo por radiación y se reduce la temperatura media radiante en la vivienda, efecto que se conoce como “pared fría”.

Por último afectarán a la patología que se pueden producir en los cerramientos, ya que el riesgo de condensaciones superficiales es mayor en los puntos en los que la temperatura superficial es más baja.

Es, por tanto, necesario considerar el impacto de los puentes térmicos en la demanda energética de los edificios así como el riesgo de formación de moho.

## 2.8. AISLAMIENTO TÉRMICO

Un aislante térmico es un material que por sus propiedades físicas no conduce el calor ni el frío, es decir no transmite a su través la temperatura con facilidad. Se caracterizan por su baja conductividad térmica.

La capacidad de aislar de un material es la resistividad térmica (inversa de la conductividad térmica vista anteriormente).

Tenemos distintos tipos de aislamientos térmicos según la posición:

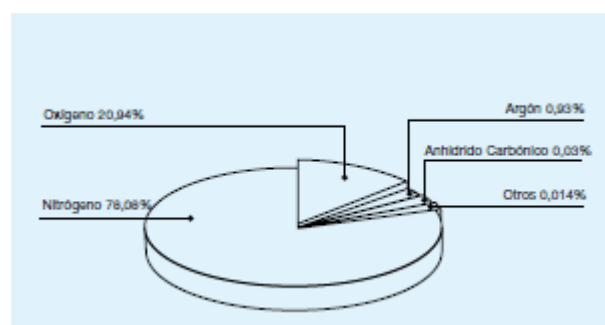
- Aislamiento térmico exterior: dejamos los materiales en el exterior y ganamos inercia térmica.
- Aislamiento térmico interior: Al colocar la capa de aislamiento al interior como por ejemplo revestimientos de madera, dejamos la masa al exterior y perdemos inercia térmica, aunque esta no es siempre necesaria.
- Inyección en cámara.

## 2.9 VENTILACION

### 2.9.1 INTRODUCCIÓN AL AIRE

El aire es un gas que envuelve la Tierra y que resulta absolutamente imprescindible para la respiración de todos los seres vivos. Está compuesto por una mezcla mecánica de varios gases, prácticamente siempre en la misma proporción y en la que destaca el Nitrógeno que es neutro para la vida animal y el Oxígeno, que es esencial para la vida en todas sus formas. El aire que nos rodea es aire húmedo, que contiene una cantidad variable de vapor de agua que reviste gran importancia para las condiciones de confort del ser humano.

Además, el aire que respiramos contiene otros elementos de gran incidencia negativa sobre la salud, como son gases, humos, polvo, bacterias,...



*Ilustración 13 Composición porcentual del aire*

## **2.9.2 OBJETIVOS DE LA VENTILACION**

Se entiende por ventilación, la sustitución de una porción de aire, que se considera indeseable, por otra que aporta una mejora en pureza, temperatura, humedad, etc.

A continuación se exponen los motivos por los que es necesario ventilar:

- Salubridad: Controlando concentraciones de contaminantes peligrosos para la salud producido por:
  - El Metabolismo de las personas (Respiración, transpiración)
  - la actividad de las personas (Fumar, uso de productos de limpieza, cocción,..)
  - Los componentes de la construcción (pinturas, pegamentos, revestimientos)
- Confort: Controlando concentraciones de contaminantes molestos para el bien estar:
  - Olores
  - Humedad relativa
- Preservar la construcción: Controlando la concentración de vapor de agua, fuente de condensaciones y moho en los puntos fríos de la vivienda.

## **2.9.3 CAUSAS DEL DETERIORO DEL AIRE**

Causas del deterioro de la calidad del aire:

- Emisiones de los ocupantes, según sus actividades: calor, CO<sub>2</sub>, vapor de agua, humo de tabaco,...
- Emisiones de los materiales de construcción y decoración, el mobiliario, etc.: Compuestos orgánicos volátiles,...
- Causas debidas a las instalaciones de ventilación/climatización. Emisiones de los componentes: partículas sólidas en suspensión, aerosoles, microorganismos, etc. Síndrome del edificio enfermo.
- Calentamiento o enfriamiento excesivos.
- Sequedad o humedad excesivas del aire.

## 2.9.4. TIPOS DE VENTILACION

### 2.9.4.1. VENTILACION NATURAL

Antiguamente las construcciones no contaban con sistemas activos de ventilación, por lo que la manera tradicional de renovar el aire era de forma natural abriendo las ventanas. Todavía se sigue haciendo en mucho de los hogares, normalmente por las mañanas, cuando el aire del exteriores más fresco y cuando el aire interior está más cargado. Igualmente, la hermeticidad en los edificios apenas se trabajaba por lo que existían infiltraciones de aire incontroladas, que también favorecía este hecho.

Antes de la aplicación del CTE [28], estaba permitido el uso de la ventilación natural, pero a día de hoy las normativas españolas la han dejado a un lado, tanto en viviendas como en edificios terciarios. La ventilación a través de las ventanas no está controlada y sucede de manera espontánea, por lo que no se asegura la calidad del aire ni los caudales mínimos exigidos. Tampoco favorece la eficiencia energética ni el ahorro,.

Se produce como se vio antes por diferencia de presiones que pueden ser de distinto origen

- Origen eólico: Se debe exclusivamente al movimiento del aire debido a fenómenos meteorológicos externos, se considera que es el fenómeno que produce el movimiento natural del aire. Un obstáculo enfrentado a una corriente experimenta presiones diferentes según su exposición al viento.
- Origen tiro térmico: El aire aumenta de volumen y disminuye su masa específica, por lo que tiende a ascender sobre el aire más frío (más denso). Por este fenómeno, en un local cerrado, el aire cálido se acumula en su parte superior, quedando el más fresco en la parte inferior. Bastaría con practicar aberturas en la zona alta para que el aire caliente tienda a salir al exterior, creando depresión en el local.

El más corriente es que la ventilación natural sea una mezcla entre ambos tipos.

### 2.9.4.2. VENTILACION MECÁNICA

El sistema de ventilación mecánica e considera la mejor solución para cumplir las exigencias del CTE DB HSE [29] y del RITE (Reglamento de Instalaciones Térmica en los Edificios para edificios terciarios) [30], ya que asegura un flujo continuo de aire y cierto grado de filtración, dentro de unos parámetros de humedad relativa.

Este presenta unas ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- Alto grado de control sobre los caudales
- Barrido efectivo del aire del local a ventilar
- Se puede personalizar el tratamiento e zonas concretas
- Posible recuperación de parte de la energía térmica ya empleada mediante recuperadores

Inconvenientes:

- Equipos que consumen energía y requieren mantenimiento
- Menor flexibilidad de adaptación a las necesidades de ocupación en locales de uso muy intermitente, consumiendo energía para ventilar lo que no hace falta

#### **2.9.4.3. VENTILACION HÍBRIDA**

La ventilación híbrida es otra de las posibilidades que se recogen en el CTE DB HSE3 [citar] para ventilar edificios residenciales. Se encuentra en un punto intermedio entre la ventilación mecánica y la ventilación natural, ya que puede funcionar en régimen de ventilación natural, si las condiciones meteorológicas son favorables y o en régimen de ventilación mecánica, si no lo son. El inconveniente que presenta este sistema es que previamente a su instalación es necesario realizar un estudio meteorológico par garantizar su correcto funcionamiento en régimen natural.

#### **2.9.5 NORMATIVA CAUDAL VENTILACIÓN MÍNIMO**

El Documento Básico HS3 [29] del código Técnico de la Edificación establece los caudales mínimos de ventilación de las viviendas. Los caudales de ventilación en impulsión y extracción vienen dados en la tabla que veremos más adelante, donde se considera que el aire entra a la vivienda por las habitaciones y el salón y sale por los aseos y la cocina.

Tras la modificación del CTE del 13 de junio de 2017 [28], que incluye entre otras novedades la modificación de la sección HS3 del documento básico de salubridad, implica nuevas exigencias en lo que se refiere a caudales de ventilación y además hace referencia explícitamente a las concentraciones máximas de contaminantes referidas a las partes por millón (ppm) de CO<sub>2</sub>.

La primera exigencia consiste en aportar un caudal de aire exterior suficiente para cumplir dos condiciones:

1. El caudal será el necesario para que en cada local la concentración media anual de CO<sub>2</sub> sea menor a 990 ppm. Pero también para que el acumulado anual de CO<sub>2</sub> que exceda de 1600ppm sea menor que 500.000 ppm·h.

La condición se satisface con una serie de condiciones de diseño, especificadas en el Apéndice C del DB HS3 [29].

2. El caudal será el necesario para eliminar contaminantes no directamente relacionados con la presencia humana. La condición se satisface con un caudal mínimo de 1.5 l/s por local habitable en períodos de no ocupación.

Las dos condiciones anteriores se satisfacen mediante el establecimiento de un caudal constante con arreglo a la tabla 2.1 de la sección DBHS3 [29]:

Tabla 2.1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables

Tipo de vivienda	Caudal mínimo $q_v$ en l/s				
	Locales secos <sup>(1) (2)</sup>			Locales húmedos <sup>(2)</sup>	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores <sup>(3)</sup>	Mínimo en total	Mínimo por local
0 ó 1 dormitorios	8	-	6	12	6
2 dormitorios	8	4	8	24	7
3 o más dormitorios	8	4	10	33	8

(1) En los locales secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor

(2) Cuando en un mismo local se den usos de local seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente

(3) Otros locales pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.)

Ilustración 14 Tabla caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables[29]

En la zona de cocción de las cocinas debe disponerse un sistema que permita extraer los contaminantes que se producen durante su uso, de forma independiente a la ventilación general de los locales habitables. Esta condición se considera satisfecha si se dispone de un sistema en la zona de cocción que permita extraer un caudal mínimo de 50 l/s.

## 2.10. NORMATIVA

### 2.10.1. CTE

El Código Técnico de la Edificación aprobado por Real Decreto 314/2006 [28], de 17 de marzo, es el actual marco normativo en España que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, establecidos a su vez en la Ley38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE).

La norma regula la construcción de todas las nuevas edificaciones y la rehabilitación de las existentes, ya sean destinadas a viviendas, o a usos comerciales, docentes, sanitarios, deportivos, industriales o socioculturales, e indica técnicas y materiales para construir edificios más seguros y eficientes desde el punto de vista energético. También establece exigencias que inciden en la funcionalidad y la habitabilidad. Todo ello adaptando las directivas europeas.

La primera parte está subdividida a su vez en varias secciones referidas cada una de ellas a las distintas áreas que deben regularse, seguridad estructural (SE), seguridad en caso de incendios (SI), seguridad de utilización salubridad (SUA), ahorro de energía (en el decreto sin acento) (HE), protección frente al ruido (HR) y salubridad (HS).



Il·lustració 15 Voista de los distintos documentos del CTE

Cada una de estas áreas se compone de los Documentos Básicos (DB), que son textos de carácter técnico que se encargan de trasladar al terreno práctico las exigencias detalladas de la primera parte del CTE. Cada uno de los documentos incluye los límites y la cuantificación de las exigencias básicas de una relación de procedimientos que permiten cumplir los requisitos.

Por ejemplo en el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) [Citar] es donde se establecen las exigencias básicas en eficiencia energética y energías renovables que deben cumplir los nuevos edificios y los que se reformen o rehabiliten. Este documento Básico consta de las siguientes secciones:

HE.1: Limitación de demanda energética

HE.2: Rendimiento de las instalaciones térmicas

HE.3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación

HE.4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria

HE.5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica

Además del documento básico que consta de las secciones descritas, el CTE pone a nuestra disposición una serie de documentos de apoyo, centrados en facilitar el cálculo mediante métodos de cálculo específicos, describir los parámetros necesarios para el cálculo, etc.

## **2.10.2 LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA**

La certificación Energética de los Edificios es una exigencia derivada de la Directiva europea 2002/91/CE [24]. En lo referente a la certificación energética, esta directiva se transpone parcialmente al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 47/2007 [26] de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.

Con posterioridad, la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [24], de 16 de diciembre de 2002, ha sido modificada mediante la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo [25], de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios, circunstancia que ha obligado a transponer de nuevo al ordenamiento jurídico español las modificaciones que introduce con respecto a la Directiva modificada.

Este Real Decreto 235/2013 [23], de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios entró en vigor el día siguiente de su publicación en el Boletín Oficial del Estado nº89 (13/04/2013), siendo voluntaria su aplicación hasta el 1 de junio de 2013. A partir de ese momento, la presentación o puesta a disposición de los compradores o arrendatarios del certificado de eficiencia energética de la totalidad o parte de un edificio, según corresponda, será exigible para los contratos compraventa o arrendamiento celebrados a partir de dicha fecha.

Las normativas europeas han intentado incidir sobre el consumo energético de las construcciones ya que representan casi el 30% del consumo de energía primaria. Se ha creado una herramienta similar a la ya empleada en el caso de los electrodomésticos.

Este Real Decreto establece la obligatoriedad de poner a disposición de los compradores o usuarios de los edificios un Certificado de Eficiencia Energética. En este certificado, y mediante una etiqueta



de eficiencia energética, se asigna a cada edificio una Clase Energética de eficiencia, que variará desde la clase A, para lo energéticamente más eficientes, a la clase G, para los menos eficientes, además de incluir su consumo estimado de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

Se establece el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. Este procedimiento será desarrollado por el órgano competente en esta materia de la Comunidad Autónoma correspondiente, encargado también del registro de las certificaciones en su ámbito territorial, el control externo y la inspección.

Sin embargo, los electrodomésticos se someten a test en un laboratorio, mientras que los edificios son sistemas mucho más complejos cuyo funcionamiento no se puede testear o estimar de manera tan sencilla, sometidos a condiciones y hábitos mucho más variables. Por ello, poner en práctica un sistema de este tipo no es posible si no se realizan grandes simplificaciones.

El objetivo de la certificación de edificios es incentivar a los promotores a construir edificios más eficientes y animar a la rehabilitación de edificios para que consuman menos energía. Esto se consigue porque, en primer lugar, una promoción con una clasificación más eficiente tiene una mejor imagen, otro argumento para su venta, y en segundo lugar, la existencia de una etiqueta facilita que el consumo de energía se convierta en un criterio más de compra por parte del consumidor.

**CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO ETIQUETA**

**DATOS DEL EDIFICIO**

Normativa vigente: construcción / rehabilitación

Tipo de edificio: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Municipio: \_\_\_\_\_

Referencia catastral: \_\_\_\_\_

C.P.: \_\_\_\_\_

C. Autónoma: \_\_\_\_\_

**ESCALA DE LA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA**

	Consumo de energía kWh / m <sup>2</sup> año	Emisiones kg CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> año
<b>A</b> más eficiente		
<b>B</b>		
<b>C</b>		
<b>D</b>		
<b>E</b>		
<b>F</b>		
<b>G</b> menos eficiente		

**REGISTRO**

\_\_\_\_\_

Válido hasta: \_\_\_\_\_

ESPAÑA  
Directiva 2010 / 31 / UE

Ilustración 16 Etiqueta ejemplo certificación energética de un edificio de viviendas

## 2.11. DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional o también conocida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) es una rama de la mecánica de fluidos, que estudia el comportamiento de los fluidos, sus parámetros como velocidad, presión temperatura, entre otros: mediante el uso de técnicas numéricas aplicadas en un computador.

El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

### 2.11.1. APLICACIÓN DE LOS METODOS NUMERICOS AL CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional es ampliamente utilizada en los diferentes segmentos de la industria y soporta el proyecto y la fabricación de centenares de productos tales como aviones, automóviles y navíos, así como los más diversos tipos de equipamientos industriales.

La mecánica de fluidos computacional puede ser utilizada desde la fase conceptual de un proyecto, ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución en producto, hasta la etapa de producción, permitiendo representar diversos escenarios.

#### 2.11.1.1. ECUACION DE CONSERVACION DE LA MASA. CONTINUIDAD

La ley de conservación de la material se cumple con independencia de la naturaleza del fluido o de las fuerzas que actúen sobre el mismo. Esto implica que a lo largo de todo un fluido la masa no se destruye ni se genera en ningún punto. Matemáticamente esta ley de conservación se expresa, utilizando el teorema de Gauss, de la siguiente manera:

$$\int_{V_f} \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV + \int_{V_f} \vec{V} \cdot (\rho \vec{v}) \cdot dV = 0 \quad (3.1)$$

El primer término de la expresión anterior representa la variación de masa por unidad de volumen y unidad de tiempo en cierto punto del espacio, y el segundo término hace referencia a la variación de velocidad de entrada y de salida de la material en el sistema.

La expresión 3.4 es denominada ecuación de continuidad válida para todo tipo de fluidos. Esta expresión aparece en gran cantidad de campos de la física, como son la Mecánica Cuántica, la Teoría Electromagnética, la Mecánica Relativista.

#### 2.11.1.2 ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de cantidad de movimiento que rige la dinámica de fluidos deriva de la 2 ley de Newton, que establece que la variación de la cantidad de movimiento de un objeto esta originada por las fuerzas que actúan sobre él.

Las fuerzas que actúan sobre un fluido son de dos tipos, fuerza de volumen y fuerza de superficie. Si consideramos un elemento de volumen  $V_o$  rodeado por una superficie cerrada  $S_o$ , las fuerzas de volumen son las que no dependen de la interacción del fluido en  $V_o$  con el medio que lo rodea y por tanto afectan a todo el elemento de volumen por igual. La fuerza gravitatoria, las fuerzas eléctricas y las magnéticas son ejemplos de estas fuerzas. En cambio, las fuerzas de superficie son

fuerzas que dependen de la interacción del fluido en  $V_o$  con el medio que lo rodea. Son fuerzas que se ejercen sobre el volumen  $V_o$  a través de la superficie  $S_o$ . Ejemplos de estas fuerzas son las fuerzas de presión, de viscosidad o fricción. Teniendo en cuenta esto, la ecuación de cantidad de movimiento en forma integral se expresa como:

$$\int_{V_f} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \int_{S_f} (\rho \vec{v} \vec{v}) \cdot \vec{n} dS = \int_{S_f} \vec{n} \cdot \vec{\tau} dS + \int_{V_f} \rho \vec{f}_m dV \quad (3.2)$$

Donde los términos 1 y 2 de la ecuación representan, respectivamente, la variación en el tiempo de la cantidad de movimiento en el volumen geométrico fijo  $V$ , y el flujo convectivo neto saliente de cantidad e movimiento a través de la superficie que limita dicho volumen. Los términos 3 y 4 son las resultantes de las fuerzas de superficie y de volumen, respectivamente, que se ejercen sobre el volumen fluido.

### 2.11.1.3. ECUACION DE ENERGIA

El primero principio de la termodinámica establece que la variación de energía de un sistema se debe al trabajo de las fuerzas que actúan sobre él y al flujo de calor intercambiado con el exterior y generado, o consumido, por el sistema. Considerando la energía total por unidad de volumen de la partícula fluida de la figura 3.1 puede expresarse como el siguiente producto:  $p(x,t) * (e(x,t) + \frac{1}{2} v^2)$  donde “e” es su energía interna específica por unidad de masa y  $v/2$  su energía cinética o mecánica por unidad e masa, al aplicar el principio de conservación se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \int_{V_f} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] dV + \int_{S_f} \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} \cdot \vec{n} dS \\ = \int_{V_f} \rho \vec{f}_m \cdot \vec{v} dV + \int_{S_f} \vec{v} \cdot \vec{\tau} \vec{n} dS - \int_{S_f} \vec{q} \cdot \vec{n} dS + \int_{V_f} Q_r dV \end{aligned} \quad (3.3)$$

En esta ecuación el termino 1 representa la variación en el tiempo de la energía total en el volumen de control fijo en el instante considerado ocupa el volumen fluido; 2 es el flujo convectivo neto de energía total que sale a través de la superficie del volumen de control; 3 es la potencia de las fuerzas másicas que actúan sobre el fluido contenido en el volumen de control; 4 es la potencia de las fuerzas de presión y las debidas a la viscosidad que se ejerce sobre el fluido a través de la superficie de control; 5 es el flujo neto de calor por conducción que se comunica al fluido a través de la superficie de control y 6 el calor comunicado por unidad de tiempo al fluido que ocupa el volumen de control por radiación y reacción química.

#### 2.11.1.4. ECUACION DE NAVIER-STOKES EN SU FORMA INTEGRADA

El procedimiento puede ilustrarse de manera simplificada a partir de la ecuación de transporte general, a cuya forma obedece a las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma integrada, ecuaciones nombradas anteriormente

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \vec{v} \phi \cdot \vec{n} dA = \oint_A \rho \Gamma \nabla \phi \cdot \vec{n} dA + \int_V S_\phi dV$$

El primer término corresponde a la variación temporal de la magnitud  $\phi$  dentro del volumen  $V$ , el segundo hace referencia a los flujos convectivos de  $\phi$  a través de la frontera ( $A$ ) debido al movimiento de velocidad  $v$ . el tercer término expresa el término difusivo de  $\phi$  en la frontera  $A$ , el cual no depende del movimiento de  $v$  (únicamente del gradiente de  $\phi$ ) y, por último, el término fuente de  $\phi$  en el interior del volumen  $V$ .

A pesar de la fórmula ser ampliamente utilizada para aplicaciones CFD, se puede afirmar que hasta el momento no existe solución analítica de la ecuación de arriba. De esa forma, es necesario resolverla por medio de algún método de discretización.

#### 2.11.1.5. METODO DE LOS VOLUMENES FINITOS

Los métodos de discretización más difundidos son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos (MEF) y el método de los volúmenes finitos (MVF), siendo este último el más utilizado en Dinámica de Fluidos Computacional. Con esos métodos, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original, como puede ser observado en la figura de abajo:

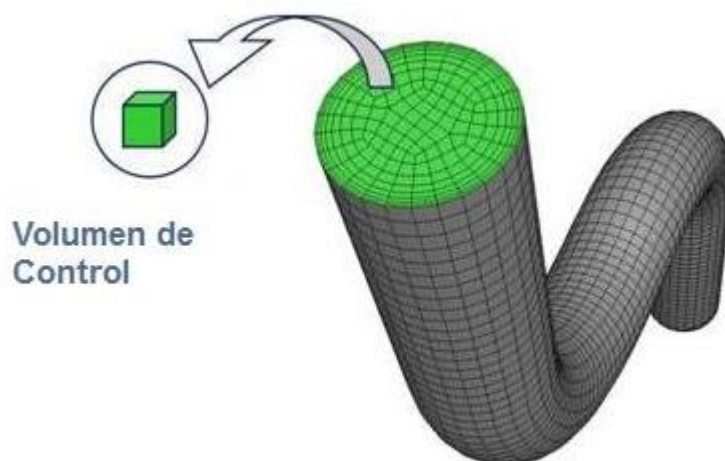


Ilustración 17 Muestra de los volúmenes de control

La principal ventaja del MVF es la naturaleza conservativa del método por su propia construcción, esto es, en todo momento las propiedades relevantes cumplen con los principales principios de conservación para cada volumen ya que las integrales de superficie que representan los términos convectivos y difusivos son las mismas para cada celda en su frontera común.

En el MVF el dominio es subdividido en un número finito de volúmenes de control contiguos y las ecuaciones de conservación son aplicadas para cada uno de ellos. En el centroide de cada volumen se encuentra un nodo para el que se calcula el valor de las variables (presión, velocidad, temperatura,...) y en las fronteras de los volúmenes se puede conocer el valor de las mismas mediante interpolación. Posteriormente se procede a la aproximación numérica de las ecuaciones integrales de conservación para obtener un sistema de ecuaciones algebraicas y su solución por métodos iterativos.

La forma algebraica de la ecuación presentada anteriormente es resultado en cada uno de los volúmenes de control, generando un sistema de ecuaciones que debe ser resuelto numéricamente. Esas ecuaciones son resueltas con el apoyo de softwares de fluido dinámica computacional.

### 2.11.2. ETAPAS BASICAS DE UNA SIMULACION CFD

A continuación describiremos las diferentes etapas que se dan durante la realización de una simulación CFD.

1. Pre procesamiento: Se define la geometría del problema.

Una simulación CFD comienza con la generación del modelo CAD que se quiere estudiar mediante un programa de diseño en 3D, como puede ser Solidworks, Catia, Pro Engineer, etc. No solo se puede definir la geometría del sólido a estudiar, sino que también se debe definir el dominio computacional, que será la región por donde circulará el fluido. Por ejemplo, si se quiere estudiar el comportamiento aerodinámico de un coche de competición, aparte de diseñar el vehículo en sí, habrá que definir el espacio por donde circulará el aire, y cuáles serán las entradas y salidas del mismo.

Una vez se tiene la geometría y el dominio computacional definido, el volumen ocupado por el fluido se divide en celdas discretas (la malla). La malla puede ser uniforme o no uniforme.

Las mallas están formadas por elementos, que pueden ser 2D (elementos de superficie como por ejemplo triángulos, rectángulos, etc.) o 3D (elementos de volumen como por ejemplo tetraedros, hexaedros, prismas, etc.). Cada elemento está caracterizado por sus nodos, las caras, las aristas y

su centro. Las propiedades físicas del fluido que se quiere estudiar, como por ejemplo la velocidad o la temperatura, son calculadas en cada uno de los nodos que conforman toda la malla, y entre nodos se interpola el resultado.

Aumentar el número de elementos, y por tanto, reducir el tamaño de estos, lo que implica reducir la distancia entre nodos y que la interpolación entre nodos sea más buena, conlleva un resultado más exacto, pero el coste computacional aumenta, a veces hasta puntos inadmisibles. Por lo tanto, hay que llegar a un equilibrio entre la precisión buscada en los resultados con el coste computacional que ello conlleva.

Una vez se ha mallado el dominio, hay que definir la configuración de la simulación. Se definen las condiciones de contorno, propiedades del fluido, velocidades, modelos de turbulencia, intervalos de tiempo para el cálculo, nº de procesadores a utilizar, etc.

Para problemas transitorios, también se definen las condiciones iniciales.

Procesamiento: la simulación se inicia y las ecuaciones se resuelven iterativamente como un estado estacionario o transitorio.

2. Llegados a este punto, se entra ya en la etapa de procesamiento, donde se solucionan las ecuaciones algebraicas pertinentes. El tiempo de cálculo requerido por los computadores dependerá de varios factores, como son el número de elementos del mallado, las especificaciones del equipo informático utilizado, la configuración de la simulación, etc. Un aspecto muy importante es el de la convergencia de los resultados a fin de garantizar una solución con suficiente exactitud.

3. Post procesamiento: Finalmente se utiliza un post procesador para el análisis y visualización de la solución resultante.

Una vez se ha terminado la simulación, se entra en la etapa de post procesamiento, donde se analizan los resultados de forma gráfica y/o numérica y se extraen conclusiones.

Actualmente existen empresas que se han dedicado a programar códigos y ofrecer software para resolver problemas CFD. Algunos de ellos son: STAR-CCM+, OpenFoam, Ansys Fluent, etc.

En el presente proyecto se utilizará el código Ansys Fluent.

### 3. . METODOLOGIA

#### 3.1. ELECCION DEL CASO DE ESTUDIO

El profesor de Ingeniería Térmica nos contó algunos detalles en clase sobre que esta ONG estaba interesada en gente que finalizara sus estudios y estuviera dispuesta a aportar sus conocimientos y tiempo a través del TFG. Nos dijo que quien estuviera interesado contactará con en al término de la clase por lo que no dude en contactar con él, ya que me pareció un tema muy interesante porque me daba la oportunidad de poner en práctica mis conocimientos adquiridos a lo largo de estos años, así como ayudar a gente con riesgo de exclusión social por diversos motivos tanto económicos, de inmigración, etc.

Primeramente tuvimos que ponernos en contacto con Oasi Urbà para entrar en el grupo de trabajo de los lunes y los viernes, que son los días que dedican para trabajar los proyectos que tienen en curso. Actualmente el proyecto en curso es el de las actuaciones en la calle Sant Ramón que es el caso de estudio de mi TFG.

Gracias a un informe que realizó para el ayuntamiento un arquitecto hace aproximadamente 10 años, tuve la posibilidad de hacerme una pequeña idea del estado en el que se encontraba el edificio de estudio. Junto con el grupo de trabajo se decidió que lo mejor era realizar un estudio de una vivienda bajo cubierta, dado que el conjunto de variables y medidas que podríamos tomar sería mayor que estudiando una vivienda que no estuviera bajo cubierta.

Tras una primera reunión con cada uno de los inquilinos de las viviendas del 4º piso, decidimos finalmente estudiar el 4º-2ª, dada la buena sintonía y las mayores facilidades.

Por lo que tuvimos que concertar una segunda reunión con los inquilinos del piso para poder subir un día que les fuera bien y tomar las medidas de toda la casa para poder realizar tanto el levantamiento de planta como el diseño de la geometría en 3D

La visita también nos sirvió para constatar el estado actual de la vivienda, al ver las condensaciones que se forman en algunas paredes, la pésima instalación eléctrica de la vivienda, las condiciones de habitabilidad, que no tienen ducha, y la falta de estanqueidad general de la vivienda. La realización de la vista de planta de la vivienda se realizó con el programa DraftSight, programa gratuito muy similar a AutoCAD y con el que ya estaba familiarizado gracias al uso dado en asignaturas de cursos anteriores del Grado de Ingeniería Mecánica.



## 3.2. PRESENTACIÓN VIVIENDA DE ESTUDIO

### 3.2.1. EXTERIOR VIVIENDA

El bloque de pisos que estudiaremos en este caso práctico está situado en la ciudad de Barcelona, en el barrio del Raval. La dirección exacta es calle Sant Ramón nº2.

La construcción de este edificio data de fecha de 1900. El edificio está compuesto por la planta baja destinada al acceso a la finca y locales comerciales en su eje central. Luego tenemos la planta entresuelo y cuatro plantas de pisos, con tres viviendas por rellano y una planta cubierta. Se le da un uso comercial a la planta baja y uno de viviendas en las plantas principal y plantas piso, con un total de 13 viviendas.

La fachada principal se encuentra en la calle Sant Ramón orientada a noreste, mientras que la fachada lateral da a la calle Sant Pau. Según datos catastrales el edificio se desarrolla en planta con una superficie construida total de  $1383m^2$  y una superficie de solar de  $248m^2$



Ilustración 18 Ubicación del edificio de estudio

A continuación pasaremos a describir los elementos principales de este edificio y su composición:

Fachada principal (c/St. Ramón.): Fachada de mampostería tomada con mortero de cal y revestid en su exterior mediante mortero de cal con acabado liso. Todas las plantas disponen de la misma distribución de obra: seis balcones y una ventana. El espesor de dicha pared es de 35cm.

Fachada 2 (c/St. Pau): Fachada de mampostería tomada con mortero de cal y revestid en su exterior mediante mortero de cal con acabado liso. Todas las plantas disponen de la misma distribución de obra: dos balcones y dos ventanas. El espesor de dicha pared es de 35cm, igual que el de la fachada principal

Fachada caja escalera: Fachada de mampostería tomada con mortero de cal revestido en su exterior mediante mortero de cal de acabo liso. Hay una única abertura de puerta hecha de acero galvanizado. El espesor de esta fachada es 10cm

Medianera 1 y 2: Medianera de pieza cerámica maciza de 15cm de espesor, tomados entre sí mediante mortero de cal. Los dos edificios vecinos se construyeron con posterioridad al edificio de estudio y su altura es aproximadamente la misma, de manera que las medianeras prácticamente no son visibles.

Cubierta 1 y 2: Cubierta plana transitable a la catalana, con acabado de rasilla cerámica. Se puede observar cómo se han aplicado, con anterioridad, pinturas impermeabilizantes sobre el acabado de rasilla. La cubierta cuenta con pendientes que provocan que desagüe en sumideros con protecciones metálicas para evitar la obturación de los mismos

Patio 1 y 2: Fachada de patio de luces que delimita con cuatro paredes verticales formadas por mortero de cal y cemento, de 15 cm de espesor, revestido a base de un mortero de cemento portland acabado con pintura plástica blanca. Por el interior del patio discurren las instalaciones de evacuación y ventilación de cocinas. Hay aberturas de huecos que forman ventanas y balconeras en los pisos que tienen orientación hacia dicho patio de luces

Estructura horizontal: Estructura de forjados unidireccionales de entrevigado cerámico y vigueta de madera, apoyados sobre la estructura a base de muros de carga. Las viguetas son perpendiculares a las fachadas.



Il·lustració 19 Distribució elements principals del edifici

### 3.2.2 INTERIOR VIVIENDA

Para la simulación nos hemos tenido que centrar en una vivienda, que será nuestra vivienda de estudio, la cual usaremos para las simulaciones y sobre la que realizaremos todos los análisis.

Los resultados del análisis luego podrán ser extrapolados para tener una idea general de cómo se comportan los pisos de este bloque en términos de eficiencia energética.

Tras consensuarlo con el grupo de trabajo de la ONG decidí como caso de estudio el piso 4-2, ya que se trata de un piso bajo cubierta, por lo que podíamos analizar una cantidad mayor de variables que si fuera algún otro piso. También influyó el tratarse de uno de los pisos que estaba en peores condiciones así como la buena predisposición de los inquilinos dado que para realizar una correcta simulación de esa vivienda serían necesarias más de una visita para tomar medidas exactas y facilitar todo el proceso de simulación.

Las paredes interiores de la vivienda tienen un espesor de 5cm y al igual que la fachada exterior está tomado con mortero de cal y revestido en su exterior mediante mortero de cal con acabado liso.

Todas las carpinterías son de madera con cristal de un espesor muy delgado (0,5cm), a causa de esta delgadez en el espesor algún cristal como el del baño se ha roto durante algún día de fuertes vientos roto en la ciudad. También destacar que ninguna de las carpinterías cierra correctamente, por lo que hay una falta de estanqueidad en todos los cerramientos destacable.

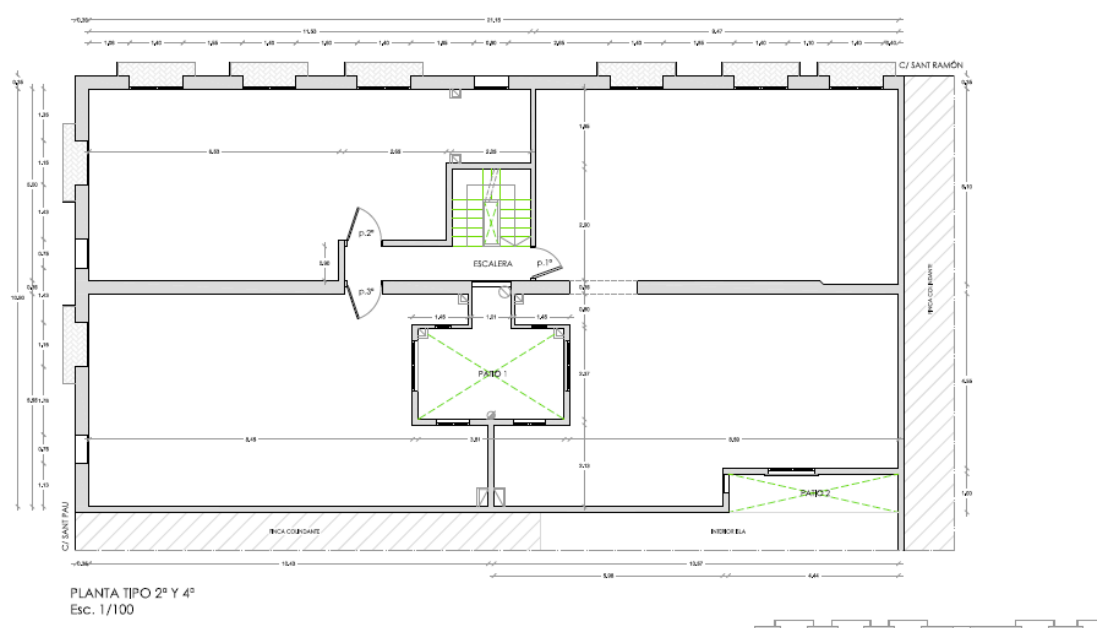
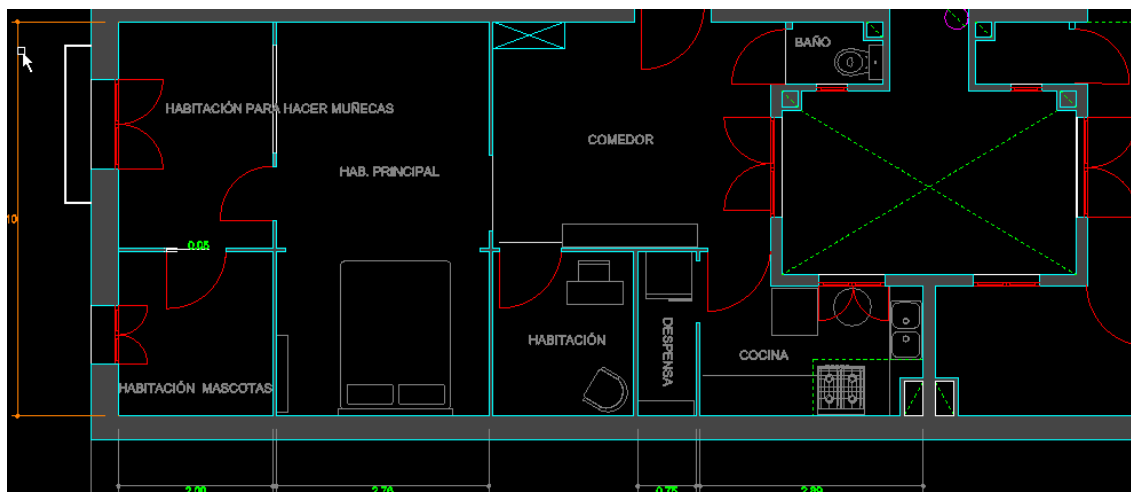


Ilustración 20 Vista en planta distribución viviendas 2º y 4º piso



Il·lustración 21 Distribución vivienda 4º-2ª

En la imagen podemos apreciar cómo se trata de una vivienda con ventilación cruzada ya que tenemos aperturas tanto hacia el exterior como al propio patio de luces del edificio. Para el patio de luces tenemos 3 aberturas, una en ventana en la cocina, un pórtico en el comedor que da al patio de luces y una ventana en el baño. Para el exterior tenemos un pórtico y una ventana que dan a la calle Sant Pau como ya hemos dicho anteriormente.

La casa consta de un baño en el que no hay ni ducha ni lavamanos, una cocina donde el extractor de humos está tapiado porque les entraban ratas por allí, con el consecuente riesgo de que cayeran encima de la comida, una despensa en donde guardan comida y se encuentra situada la nevera y luego el comedor.

La habitación principal que es donde hacen más vida, sobretodo en invierno ya que al no disponer de calefacción instalada en la vivienda se ven en la obligación de poner un radiador eléctrico. Debido a la falta de estanqueidad general de la vivienda, el lugar en el que mejor están es en la habitación principal ya que allí las corrientes de aire son mínimas ya que la habitación no da a ninguna ventana.

Podemos observar como para que les llegará la luz a la habitación principal hicieron una especie de ventana vacía sin cristal para que pudiera entrar la luz proveniente de la calle, ya que como hemos dicho allí es donde hacen más vida.

Luego tenemos dos habitaciones más en la parte de la fachada Sant Pau que están destinadas a las mascotas una, ya que tienen varios gatos y un perro, y la otra a las muñecas que hacen por afición durante sus tiempos libres.

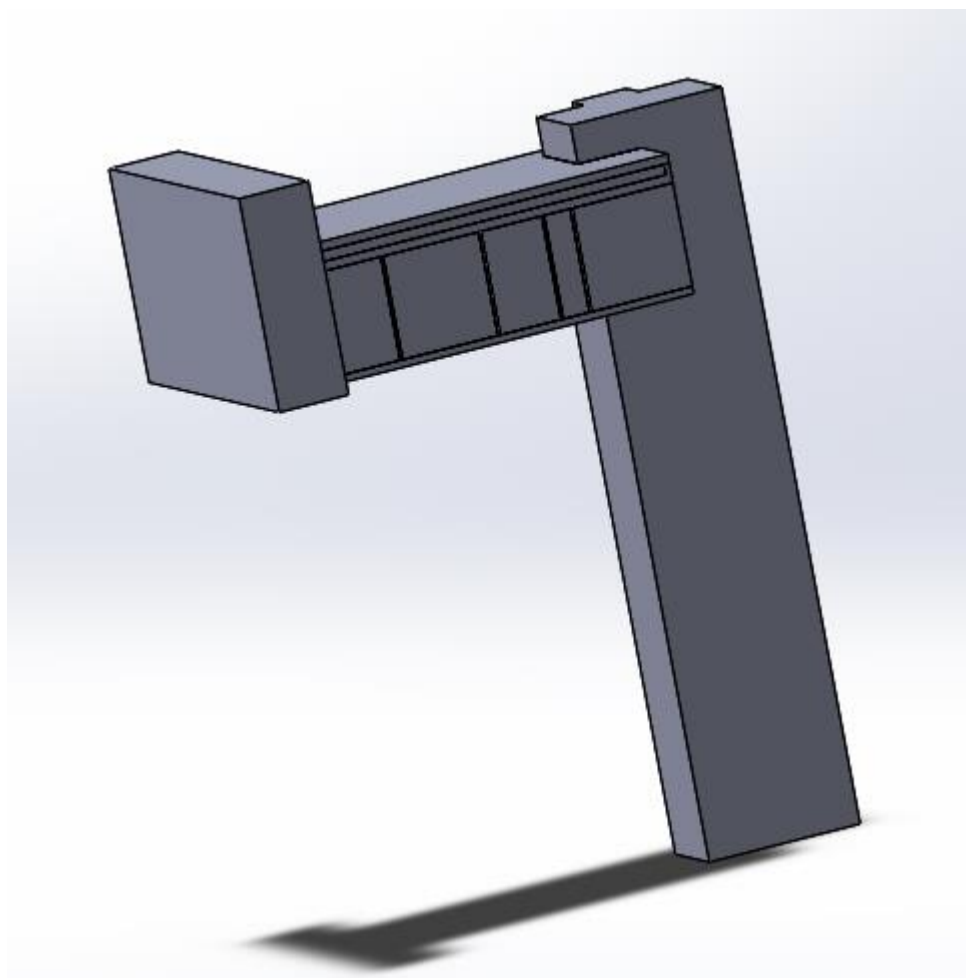
Destacar que el estudio que realizaremos será en las condiciones iniciales en las que se construyó la casa, es decir, a causa del tiempo se han ido deteriorando muchas partes de la vivienda, especialmente las ventanas y las puertas del balcón ninguna cierra correctamente, perjudicando la estanqueidad del inmueble, por lo que las condiciones de habitabilidad aún son peores que las que observaremos en el estudio realizado durante la simulación.

### 3.3. REALIZACIÓN DE LA GEOMETRIA

Para la geometría tenemos varias opciones para realizarla. Importar la geometría realizada usando un programa externo como sería SolidWorks y guardando la geometría como archivo STEP o IGES para que el programa ANSYS la reconozca. La otra opción es usar uno de los dos softwares de modelado que incorpora el programa que son SpaceClaim o Design Modeler.

Una vez teníamos la geometría correcta en cuanto a medidas, tuvimos que añadirle un gran cubo en la parte frontal de la fachada que representara el aire atmosférico en la posterior simulación

Una vez teníamos el cubo de atmosfera, también tuvimos que rellenar todo el patio de luces, ya que en el interior de este se encuentra aire, por lo que tendremos que dibujarlo como un sólido en CAD para que luego en el procesador decirle que ese conjunto sólido es un fluido, en este caso aire.



Il·lustració 22 ImagenSolidWorks de la geometria

Tras intentar hacer la simulación y obtener *floating points* (puntos de flotación), que son puntos en el que las condiciones de contorno o la malla son de mala calidad, lo que provoca que el valor de la iteración diste mucho de los valores anteriores por lo que se automáticamente el programa da por finalizada la simulación, ya que a partir de ese punto la dispersión de resultados sería muy elevada.

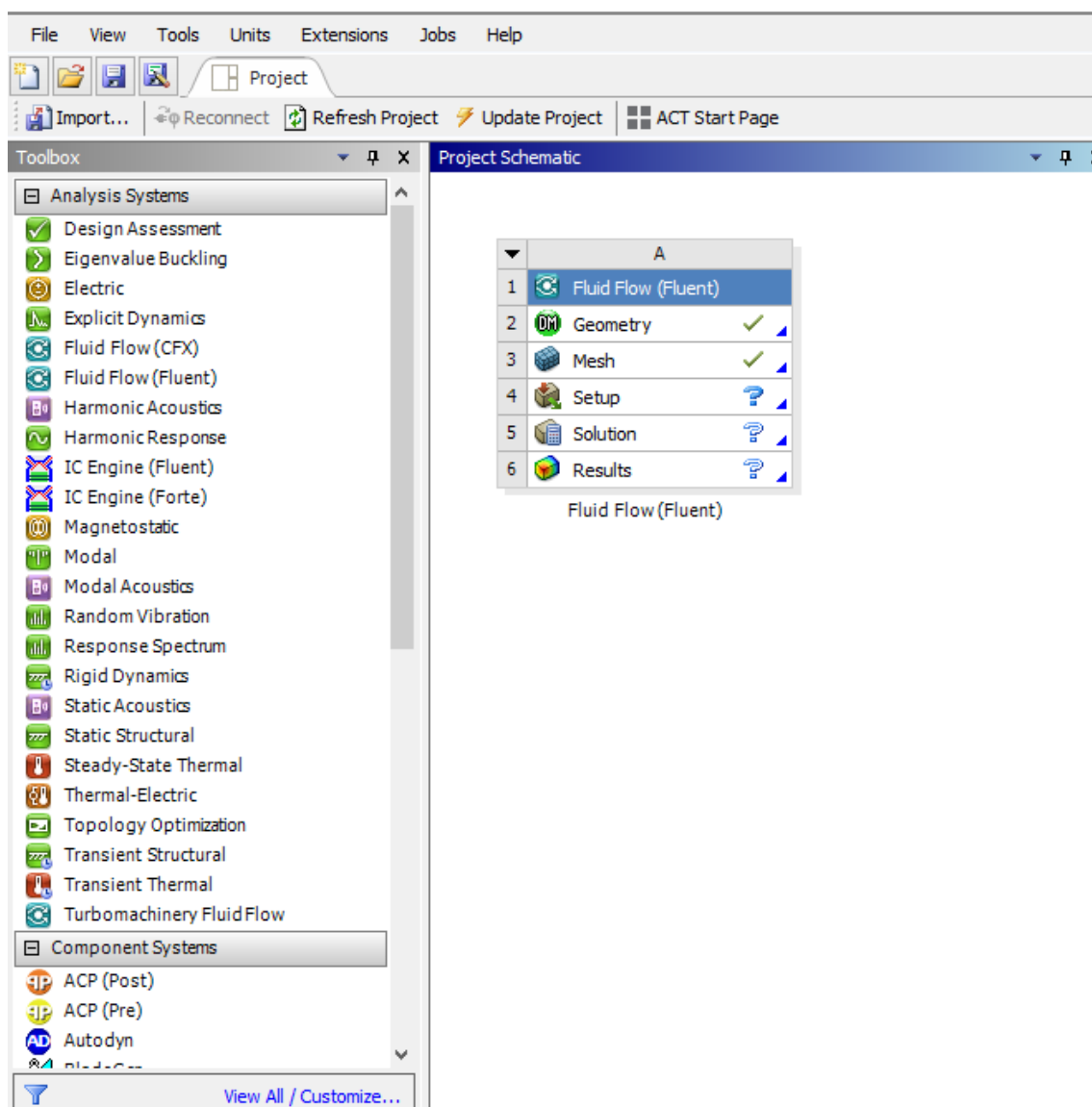
Tras analizar me di cuenta que el error estaba en que había dibujado como un sólido todo el fluido exterior (patio de luces y atmosfera) pero en cambio el aire del interior de la vivienda no lo habíamos dibujado, razón por la cual a las pocas iteraciones de la simulación obteníamos los *floating points*. Así que la solución fue dibujar también todo el aire del interior como cubos para luego en el *cell zones* decirle que son fluido aire.

Una vez ya teníamos la geometría dibujada, procederemos a realizar el estudio de la malla.

### 3.4. REALIZACIÓN DE LA MALLA

Para este caso tendremos que realizar dos estudios: uno para el fluido de la cámara de aire y otro para el fluido del interior de la vivienda. Estos estudios nos permitirán obtener la estructura y caracterización de la malla más adecuada para el proceso de cálculo que realizaremos más adelante.

Cuando abrimos el programa ANSYS la pantalla principal que nos encontramos es la siguiente

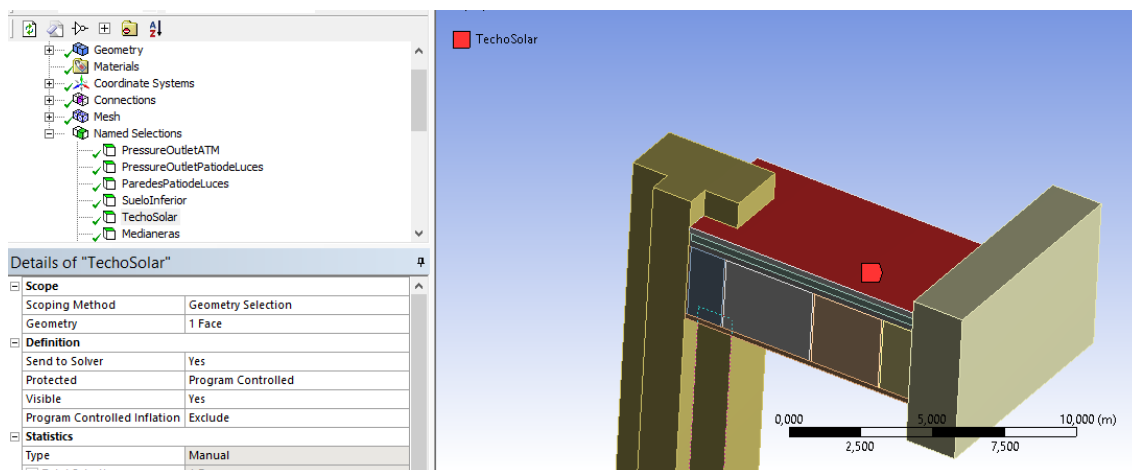


Tenemos muchas opciones en cuanto a *Analysis Systems*, es decir el tipo de análisis que queremos realizar, para nuestro caso de estudio se trata de *FluidFlow (Fluent)*, por lo que si lo seleccionamos se nos abre el cuadro de dialogo con las diferentes partes del proceso, que hemos explicado anteriormente y que van desde geometría hasta análisis de los resultados.




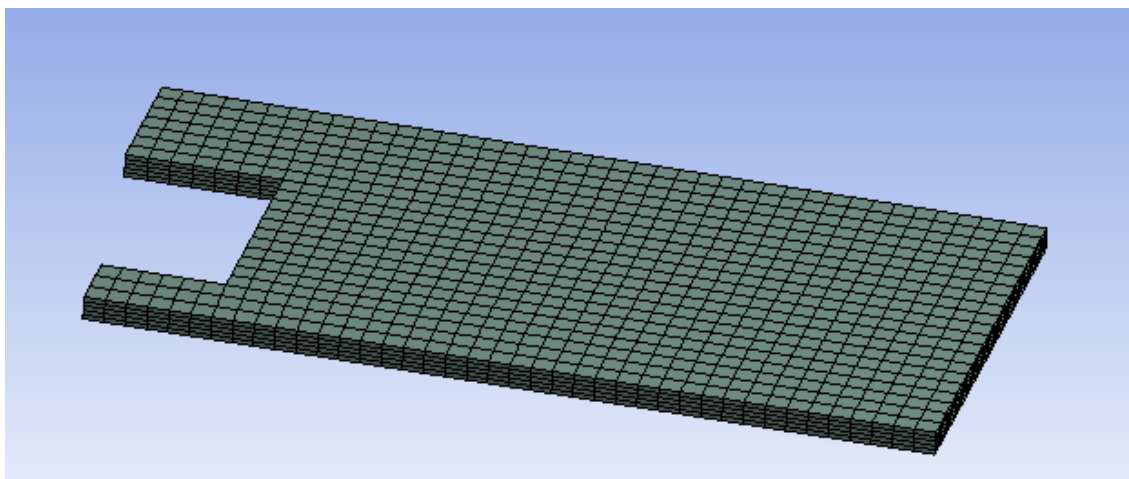
Una vez se tiene la geometría, el siguiente paso es el mallado, haciendo doble click en *mesh* se nos abre el software de mallado, una interface donde deberemos elegir tanto el tipo de malla que usaremos, como las condiciones de contorno que necesitaremos para la simulación.

Antes de empezar con la malla, debemos analizar el caso de estudio y fijarnos en cuáles serán las zonas específicas a analizar a las que les tendremos que dar unas condiciones de trabajo más adelante para una correcta simulación. Para dar estas condiciones, en el proceso de mallado tenemos que seleccionar la cara y darle un *NAME SELECTION*, eso nos permitirá más adelante poder entrar unas características a esta región de la geometría. Para el caso de estudio del techo, las condiciones de contorno nombradas son: TechoSolar (que corresponderá a la cubierta del edificio), la fachada solar (Partes del conjunto techo que están expuestas al Sol), Techo vivienda (será la parte del techo correspondiente al interior de la vivienda) y las medianeras (paredes en contacto con los edificios colindantes, por lo que el Sol no incide directamente).



Il·lustració 23 Ejemplo de Condición de Contorno para el Techo solar del edificio

Una vez nombradas las condiciones de contorno, procedemos a la realización de la malla. Cuando la geometría está formada por distintos componentes, lo más recomendado es realizar mallas independientes para cada uno de estos componente según su forma geométrica, ya que por ejemplo no tenemos por qué usar el mismo método para mallar un cuadrado que un triángulo. Existen distintos métodos de mallado como por ejemplo: automático, *Sweep method*, *Hex dominant*, *Tetrahedrons*. Con esta herramienta  podemos introducir distinta restricciones para puntos, aristas, superficies,.. en post de tener una malla con más calidad. El programa también pone a nuestra disposición restricciones en cuanto al número de elementos, tamaño de estos, herramientas para realizar un Face Meshing y tener una malla uniforme, etc.



Il·lustració 24 Exemple de malla realitzada amb Sweep Method

Dado que se trata de analizar la cámara de aire y esta es un tipo de geometría que se puede apilar, es decir podríamos encajar una encima de la otra como si se tratara de piezas de lego. A causa de esta geometría, la opción más recomendada es utilizar un *Sweep method*, que consiste en dibujar la malla que solicitamos en una cara de la geometría, con las características de malla que decidamos (tamaño de elementos, etc.) y luego hacemos una proyección de esta malla, un barrido (*Sweep*), el cual proyectara la malla dibujada en esta cara hasta la cara opuesta. Esta proyección tendrá un número  $x$  de divisiones hasta llegar a la cara opuesta, número que determinaremos nosotros, y que será el número que iremos variando para determinar la malla más adecuada para este modelo.

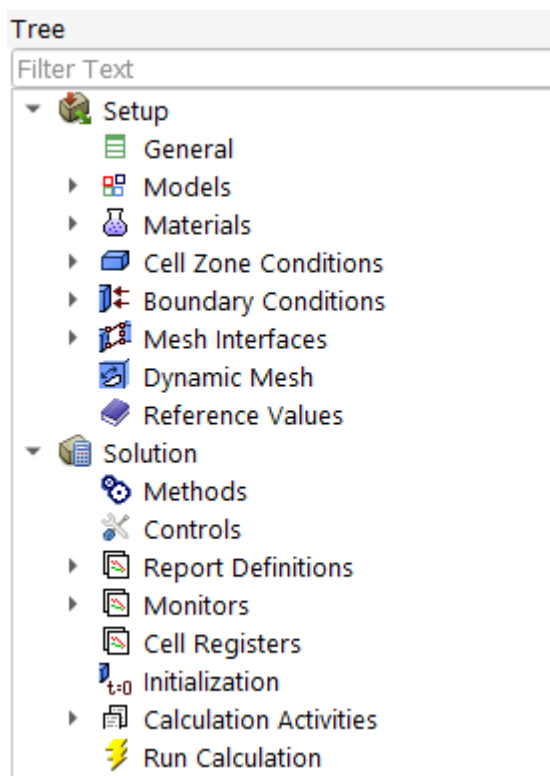
Para las mallas en transferencia de calor, la parte más importante de la malla es la que va en el sentido del flujo de calor, por lo tanto para la malla que va en perpendicular al sentido del flujo de calor no tendrá una gran influencia la variación a lo largo de la simulación, tanto para la cámara de aire como para el aire interior, razón por la que nos decantamos en hacer un tamaño de malla de 0.25, un tipo de tamaño estándar, y que usaremos para todas las simulaciones de la cámara de aire.

Procederemos primero a realizar una simulación con nº de divisiones igual a 1, aun a sabiendas que no será la malla correcta, nos permite tener información desde el primer punto a la hora de trazar la gráfica de estudio de la convergencia de la convergencia de malla.

También hemos prepararemos mallas para diferente nº de divisiones: 3, 5, 7, 9, las cuales procederemos a analizar después

### 3.5. ESTABLECER LAS CONDICIONES DE CONTORNO

Tras el mallado procedemos a abrir el *SetUp*, en donde introduciremos todas las condiciones de contorno, condiciones iniciales del problema y definiremos todas las variables antes de proceder a la simulación.



Il·lustració 25 Vista general software SetUp

Para las condiciones de contorno, debemos decidir las ecuaciones que intervendrán en la simulación, esto va en función del tipo de simulación que vamos a realizar, para nuestro caso de estudio deberemos activar las ecuaciones de energía, y las de radiación. Para la radiación usaremos el modelo P1, el cual incluye el *Solar Raytracing*, una calculadora solar propia del programa ANSYS, en la cual le introducimos las coordenadas del lugar, la zona horario y el vector unitario norte y este. Con estos datos el programa nos podrá calcular las condiciones de radiación a cualquier hora, de cualquier día del año en el lugar asignado, para esto debemos indicarle la coordenadas de latitud, longitud y zona horario de Barcelona.

Una vez introducimos los Datos del modelo a simular, debemos introducir la propiedades de los materiales que forman el modelo de estudio, para este caso el fluido será aire incompresible, y el sólido mortero de Cal, tal y como hemos descrito en el apartado de descripción de la vivienda de estudio. Para definir el mortero de cal hemos tenido que informarnos de algunas propiedades de este material para dárselas al programa como por ejemplo la densidad, la  $C_p$ ,...

Una vez esto, pasamos al siguiente paso que son las *Cell Zone Conditions*, donde indicaremos que geometrías del conjunto son fluido como por ejemplo de la caja atmosférica y que geometrías son sólidos, como las paredes del muro que en este caso son de mortero de cal ya que es el único material que hemos tenemos en el techo.

Ahora pasamos a las *Boundary Conditions*, junto con las *Cells Zones* una de las partes más importantes de toda la *simulación*, aquí debemos darle propiedades térmicas a cada una de las zonas que hemos definido antes de hacer el mallado, Para las medianeras se ha dado una condición de contorno de Convección, y se ha desactivado la *Solar Ray Traicing*, ya que la radiación no incide directamente. Se ha decidido dar un coeficiente de convección de  $8 \frac{W}{m^2K}$  según recomendaciones de simulación para interiores.

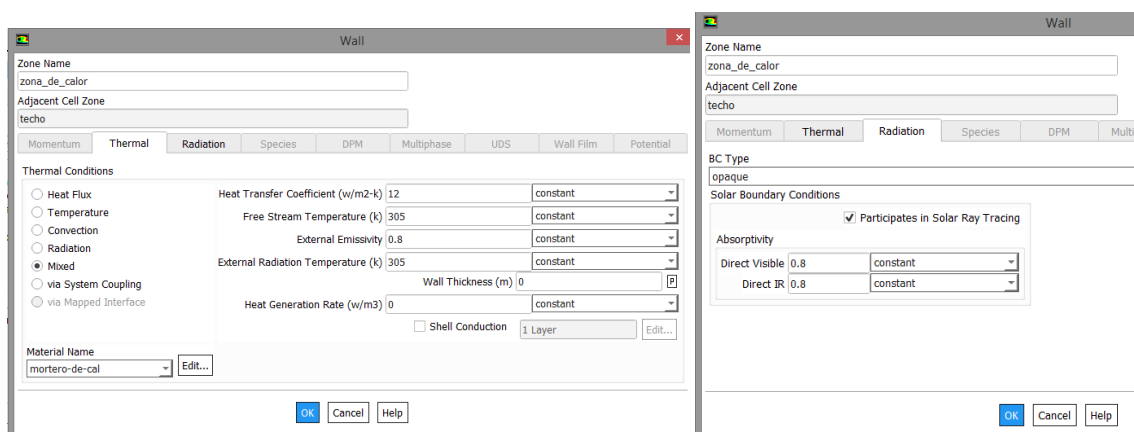


Ilustración 26 Ejemplo entrada datos Condición Contorno asignada anteriormente

Para las paredes solares la condición asignada es *mixed* ya que para estas actuará tanto la radiación como la convección, estableciendo un coeficiente de transferencia exterior de  $12 \frac{W}{m^2K}$  y una radiación según la Solar ray traicing, además de indicar que la temperatura en el exterior está a la temperatura de 305K

Una vez ya tenemos todas las condiciones de contorno establecidas, ya estamos más cerca del momento de empezar la simulación.

Ahora pasamos al apartado de *Solution controls*, donde debemos escoger los factores de relajación y establecer los residuales.

Para los establecer los residuales, que serán de  $1e-05$  para todos excepto para E y P que serán de  $1e-06$ . También estableceremos unos límites de 298 inferior i 343 superior, esto se debe a que durante los cálculos de la simulación, pueden haber valores puntuales por debajo de estos valores que en la realidad no serían posibles, por lo tanto lo que estamos haciendo es indicarle al programa que si en algún momento una ecuación da como resultado una  $T^\circ$  inferior a 298 borre dicho resultado y lo coja como 298. Respecto a los factores de relajación los valores empleados serán los siguientes, siempre siguiendo las recomendaciones en cuanto al programa de que la Energía y la P1 no estén por debajo de 0.8, etc (ver una hoja que tengo)

#### Solution Controls

##### Under-Relaxation Factors

Pressure

0.3

Density

0.8

Body Forces

0.8

Momentum

0.7

Energy

0.9

P1

0.9

Ilustración 27 Valores de relajación

Una vez hemos llegado hasta aquí, tan solo nos falta decidir que variables van a ser las que analizaremos para sacar datos de cara a realizar el estudio de mallado para la cámara de aire.

Al tratarse de la primera simulación que realizamos sobre la cámara de aire desconocemos el comportamiento de los diferentes parámetros, por lo que decidimos analizar distintas variables para luego determinar cuál es la más representativa.

A parte del residual que el programa grafica por defecto, analizaremos la temperatura en 3 puntos del conjunto del techo: uno en la parte superior del techo, otro en el interior de la cámara de aire y otro en la parte inferior del techo. Además en post de tener un mayor control, hemos decidido también analizar el flujo de calor en la parte inferior del techo, el cual también nos dará otro tipo de punto de vista. Gracias a esto tendremos 5 fuentes de información diferente para llevar a cabo el análisis.

Una vez llegado a este punto y antes de realizar el cálculo debemos realizar una inicialización, para borrar todos los registros anteriores y empezar desde cero, también decidimos si realizamos una *Hybrid initialization* o una *Standard Initialization* (la cual se iniciará siempre con las mismas

condiciones iniciales que asignemos). Una vez realizado en *Run Calculation* decidimos el número de iteraciones que queremos que realice el programa y empezamos la simulación.

Tras la realización de la simulación, y comprobar que la simulación nos da un resultado que ha convergido, podemos proceder al análisis de los resultados. El programa pone a nuestra disposición infinidad de resultados como por ejemplo como se ha comportado la presión a lo largo del caso de estudio, los puntos de más temperatura, corrientes de aire, etc.

### 3.6. METODOLOGIA ESTUDIO DE CONVERGENCIA DEL PISO COMPLETO

Debido a que la geometría del conjunto de la vivienda es de una complejidad mucho mayor que la del conjunto del techo, antes de empezar se decide realizar dos pasos previos a la realización del estudio completo: 1-una malla automática para ver que el programa lea la geometría correctamente y pueda mallar sin problemas y 2-Una simulación con la malla automática realizada para corroborar la ausencia de *floating points*.

Al realizar la malla, nos encontramos ante la situación de que tenemos superficies superpuestas, con lo que el módulo de mallado de ANSYS no puede realizar su faena y nos da error al realizar la malla.

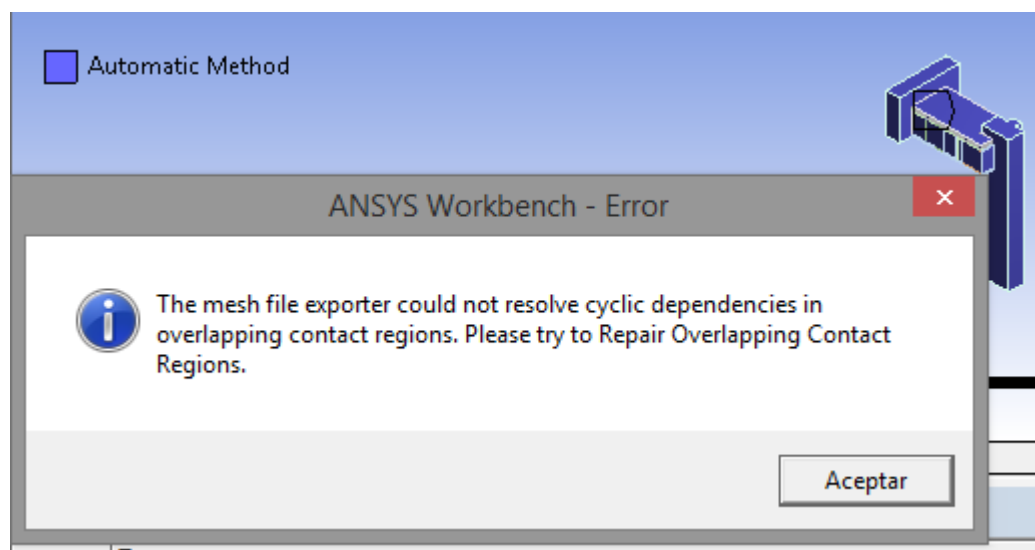


Ilustración 28 Error descrito

Ante la dificultad de reparar la geometría, me dispongo a realizar de nuevo la geometría empezando desde cero y teniendo especial cuidado en todas las zonas interiores donde hay contacto entre varios de los sólidos dibujados. Tras realizar toda la geometría de nuevo nos seguimos encontrando con el mismo error, por lo que habrá que buscar otra solución, hasta que surge la idea de mallar por separado algunas partes del piso, para luego juntarlo en una malla general, por lo que decido mallar por un lado el patio de luces y por el otro la vivienda de estudio

Esta alternativa nos da los resultados esperados, por lo que podemos seguir adelante y hacer la segunda corroboración. Para esta corroboración, seguiremos los mismos pasos que para la simulación realizada en el techo:

Activar las ecuaciones de energía, y las de radiación. Para la radiación usaremos el modelo P1, el cual incluye el *Solar Ray tracing*, en la cual le introducimos las coordenadas del lugar, la zona horario y el vector unitario norte y este de Barcelona.

Introducimos las propiedades de los materiales que forman el modelo de estudio, para este caso el fluido será aire incompresible, y el sólido mortero de Cal, tal y como hemos descrito en el apartado de descripción de la vivienda de estudio. Para el estudio definiremos unas condiciones de verano con todas las aperturas abiertas, por lo que en las ventanas y puertas habrá aire, razón por la que solo tenemos un material sólido definido.

Pasamos al siguiente paso que son las *Cell Zone Conditions*, donde indicaremos que geometrías del conjunto son fluido como por ejemplo de la caja atmosférica y que geometrías son sólidos, como las paredes del muro que en este caso son de mortero de cal ya que es el único material.

Ahora pasamos a las *boundary conditions*, para las medianeras se ha dado una condición de contorno de Convección, y se ha desactivado la *Solar Ray tracing*, ya que la radiación no incide directamente. Se ha decidido dar un coeficiente de convección de  $8 \frac{W}{m^2 K}$  según recomendaciones de simulación para interiores.

Para las paredes solares la condición asignada es *mixed* ya que para estas actuará tanto la radiación como la convección, estableciendo un coeficiente de transferencia exterior de  $12 \frac{W}{m^2 K}$  y una radiación según la *Solar Ray Tracing*, además de indicar que la temperatura en el exterior está a la temperatura de 305K

La única diferencia con la simulación del techo es que para las paredes interiores, se ha optado por un *via system coupling*, recomendación expresa de ANSYS para las geometrías que son encajes, además de afirmar que participa en el solar ray tracing.

Ahora pasamos al apartado de *Solution controls*, donde debemos escoger los factores de relajación y establecer los residuales.

Para los establecer los residuales, que serán de  $1e-05$  para todos excepto para E y P que serán de  $1e-06$ . También estableceremos unos límites de 298K inferior i 343K superior, tal y como ya hemos explicado anteriormente para el techo. Respecto a los factores de relajación los valores empleados serán los mismos, siempre siguiendo las recomendaciones en cuanto al programa de que la Energía y la P1 no estén por debajo de 0.8, etc.

Una vez hemos llegado hasta aquí, tan solo nos falta decidir que variables van a ser las que analizaremos para sacar datos, al tratarse de una comprobación, en la que queremos ver que todo funciona correctamente, escogeremos solo el flujo de calor a través del suelo de la vivienda, ya que para el techo ha sido la característica más representativa.

Al realizar el *SetUp* para la malla automática aparecen *floating points*, los cuales tras un exhaustivo análisis encontramos que el problema radicaba en las superficies de contacto entre sólidos con diferentes dimensiones, que provocaba que el programa no asignara correctamente las diferentes condiciones de contorno, por lo que la simulación no se podía realizar correctamente. Esto nos obliga a rehacer la geometría, haciendo hincapié en las superficies de contacto y marcando las zonas de contactos en los dos sólidos.

Vista cubo aire atmosférico vs vista fachada exterior vivienda

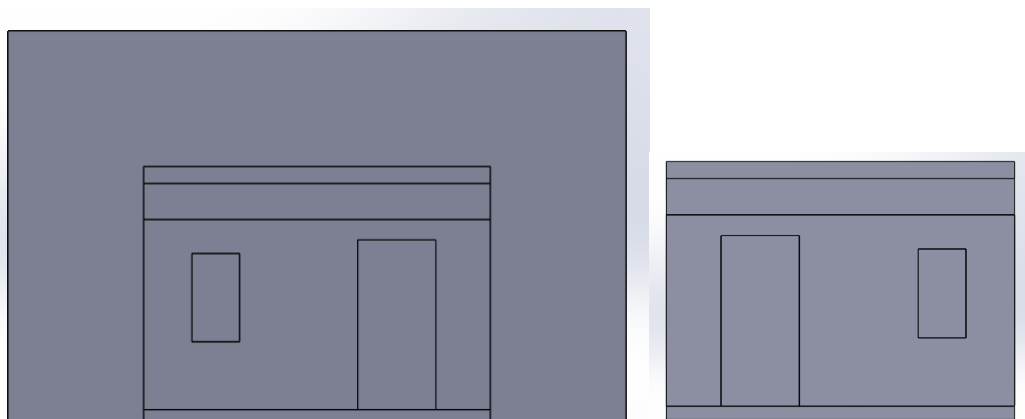
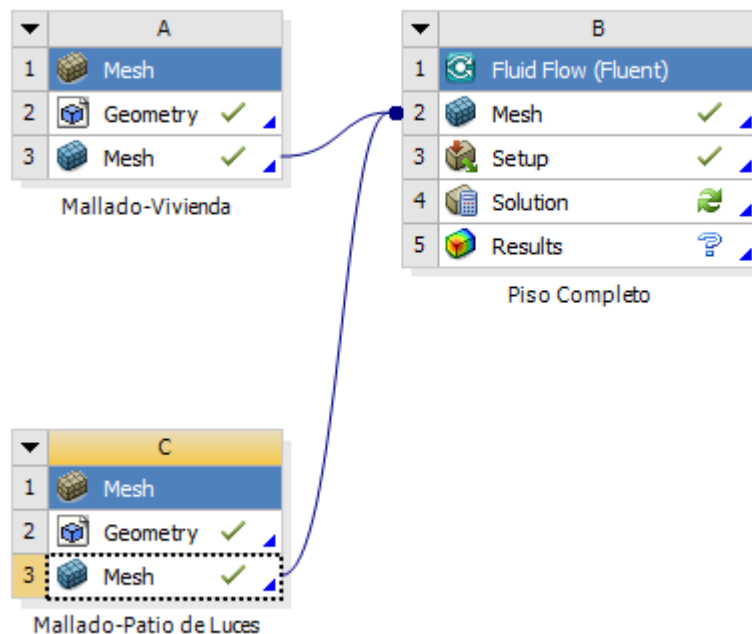


Ilustración 29 Representación solución adoptada



Tras esta modificación, probamos otra vez una simulación simple y nos encontramos con floating points otra vez, los cuales deducimos tras otro estudio que a pesar de haber acotado las zonas de contacto para evitar malas condiciones de contorno, en las superficies de contacto entre fluido y fluido seguimos teniendo problemas. Buscamos en los tutoriales de ANSYS hasta que damos con la posibilidad de que en las zonas de contacto entre fluido y fluido podamos realizar un *matching*, de tal manera que de estas dos superficies de contacto creara una interior común, lo cual creemos que nos evitará los problemas que estamos teniendo desde el inicio de la simulación.



Il·lustració 30 mallado por separado de los elementos

Corroboramos que la solución adoptada sea la correcta, y efectivamente tras realizar dicha simulación corroboramos la ausencia de *floating points*, lo que nos indica que ya estamos en el camino correcto y que ya podemos empezar a generar la malla sobre la que realizaremos el estudio de convergencia.

Empezamos con la malla de la vivienda, la cual iremos haciendo por partes según el tipo de geometría que tengamos delante:

-Para la cámara de aire usaremos la misma malla que hemos realizado en el estudio de convergencia.

-Para el techo y el suelo usaremos también la malla empleada en el anterior estudio de convergencia.

-Para los aires del interior de la vivienda usaremos un tamaño de malla de 0.2cm y el método *Sweep*, mientras que el número de divisiones verticales será el valor que iremos variando durante el estudio.

-Para las puertas y ventanas, las cuales para este estudio estarán representadas como aire (situación de verano con todas las aperturas de la vivienda abiertas), emplearemos el mismo método *Sweep* mientras vamos variando el número de divisiones acorde también con el número de divisiones que demos al aire del interior. Además para garantizar el correcto funcionamiento de la malla, y al tratarse de geometrías de muy poco espesor, añadiremos una condición de mallado en los bordes, que nos garantice un número de elementos en esa dirección de 5.

Para el patio de luces usaremos un método de hexaedro dominante, con un tamaño de elemento de 0.25cm y un *face meshing* en todas las caras para garantizar una uniformidad en la malla. Introduciremos una condición en las aristas verticales para ir variando el número de divisiones y poder realizar el estudio también del patio de luces

Para el cubo de aire realizaremos las mismas acciones que para el patio de luces, con la única diferencia que el número de divisiones en la arista vertical será menor al tratarse de una geometría más pequeña.

Para las paredes interiores 1 hemos usado un método de tetraedros, con un *face meshing* para garantizar la uniformidad de la malla y un tamaño de malla de 0.25. Además, dado que el espesor de las paredes es de 5cm, y para garantizar una buena simulación en transferencia de calor, hemos puesto una condición extra en estas aristas para que haya un mínimo de 5 divisiones en este espesor tan pequeño.

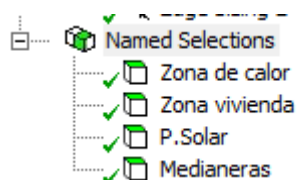
Para las paredes interiores 2 hemos realizado el mismo mallado que para la 1, con la diferencia de que hemos usado el método de hexaedro dominante, ya que con este nos salía una calidad suficiente buena y no ha sido necesario el uso de tetraedros.

Una vez ya tenemos las mallas definidas para los elementos sólidos y para la cámara de aire, solo nos queda realizar el estudio de convergencia de la malla para el aire interior junto con el patio de luces y el cubo de aire atmosférico. Este estudio está en curso en el momento de la entrega del trabajo.

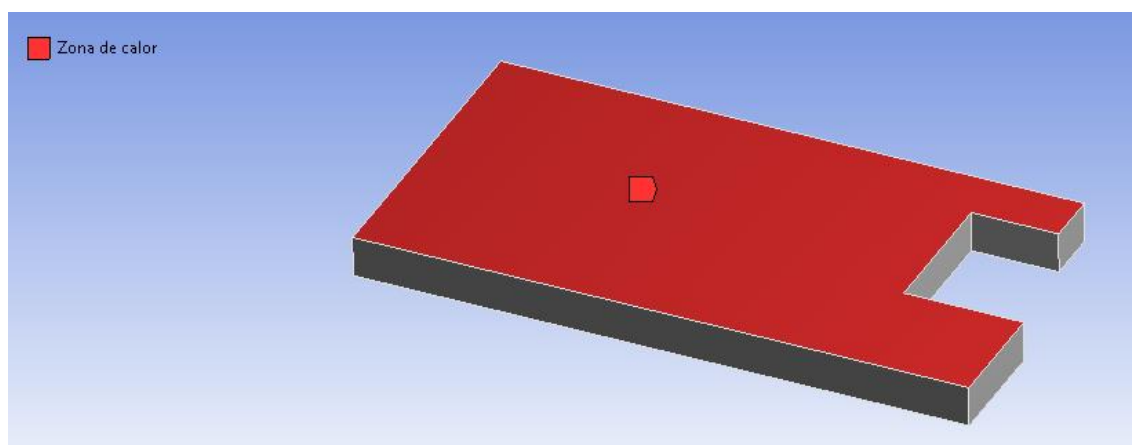
## 4. RESULTADOS

### 4.1.RESULTADOS ESTUDIO MALLA PARA LA CÁMARA DE AIRE

Ahora procederemos a mostrar los resultados obtenidos para el estudio de malla de convergencia de la cámara de aire, mostramos algunas de las condiciones de contorno que hemos seleccionado

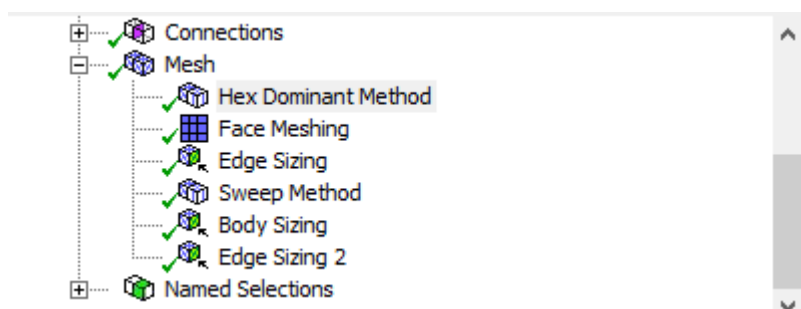


Il·lustració 31 Condicions de contorno para el techo

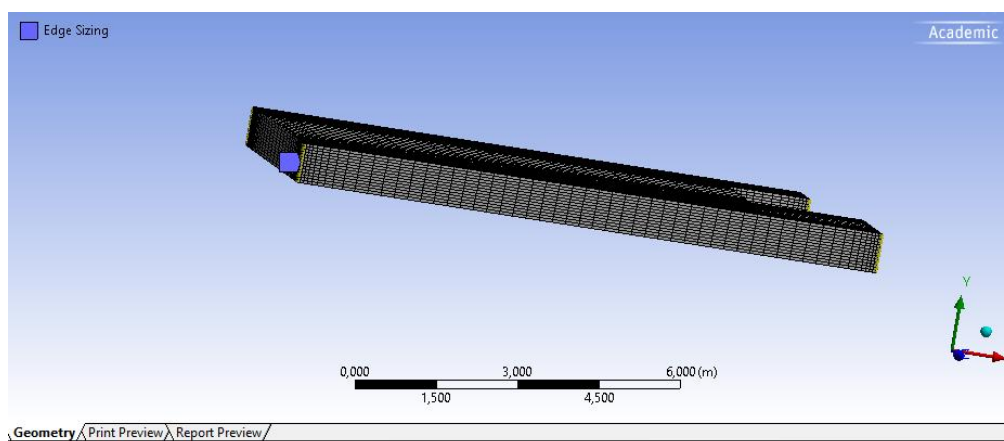


Il·lustració 32 Condicion de controno zona de calor

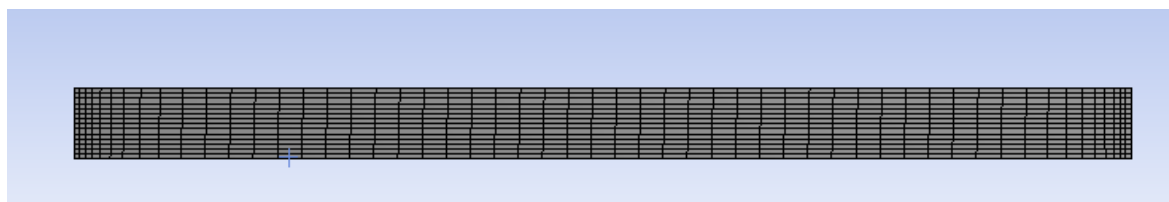
El tipo de mallado seleccionado tal y como hemos explicado en la metodología ha sido el siguiente:



La malla del techo no variara y aquí podemos ver una muestra de cómo ha quedado



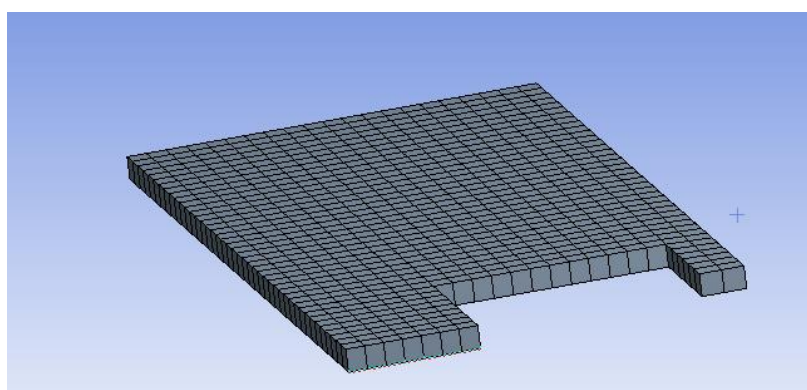
*Ilustración 33 Malla correspondiente al techo*



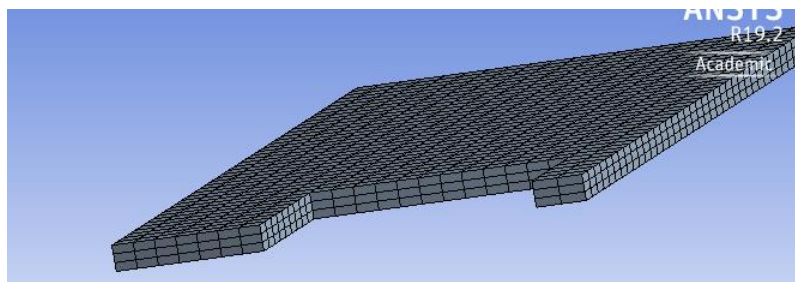
*Ilustración 34 Vista lateral malla del techo*

Para la parte de la cámara de aire, iremos variando la densidad de malla, dejando todos los valores como están y variando el número de divisiones del método *Sweep*.

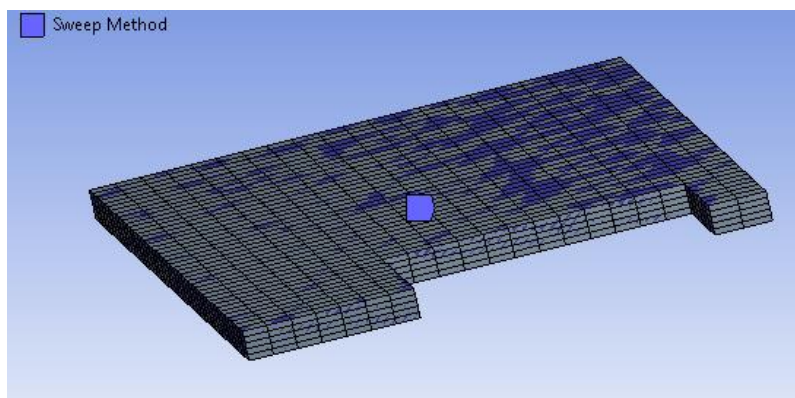
A continuación presentamos las diferentes mallas que se han realizado :



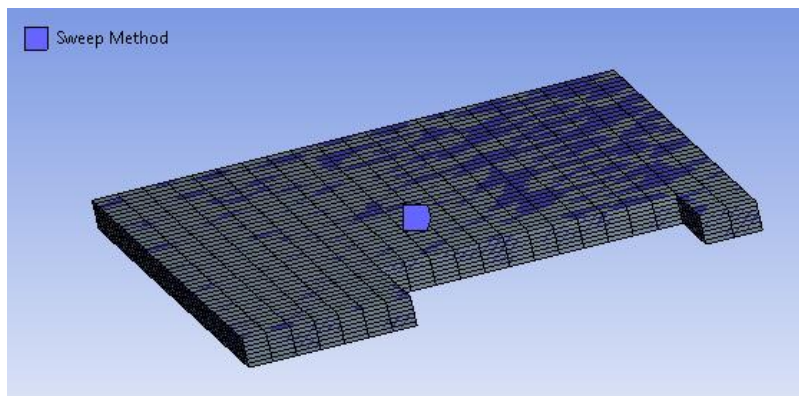
*Ilustración 35 Malla número de divisiones igual a 1*



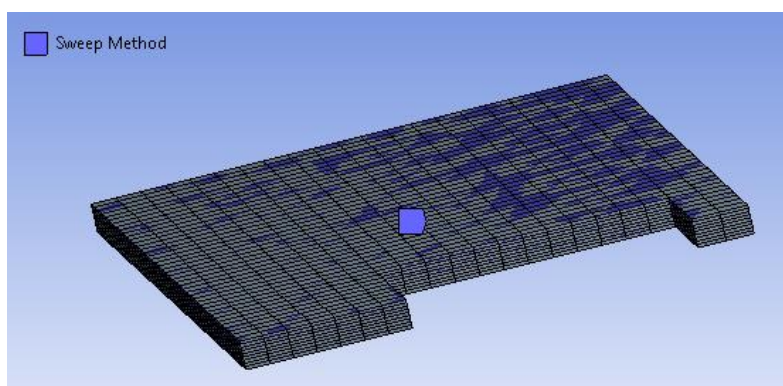
Il·lustració 36 Malla número de divisions igual a 3



Il·lustració 37 Malla número de divisions igual a 5

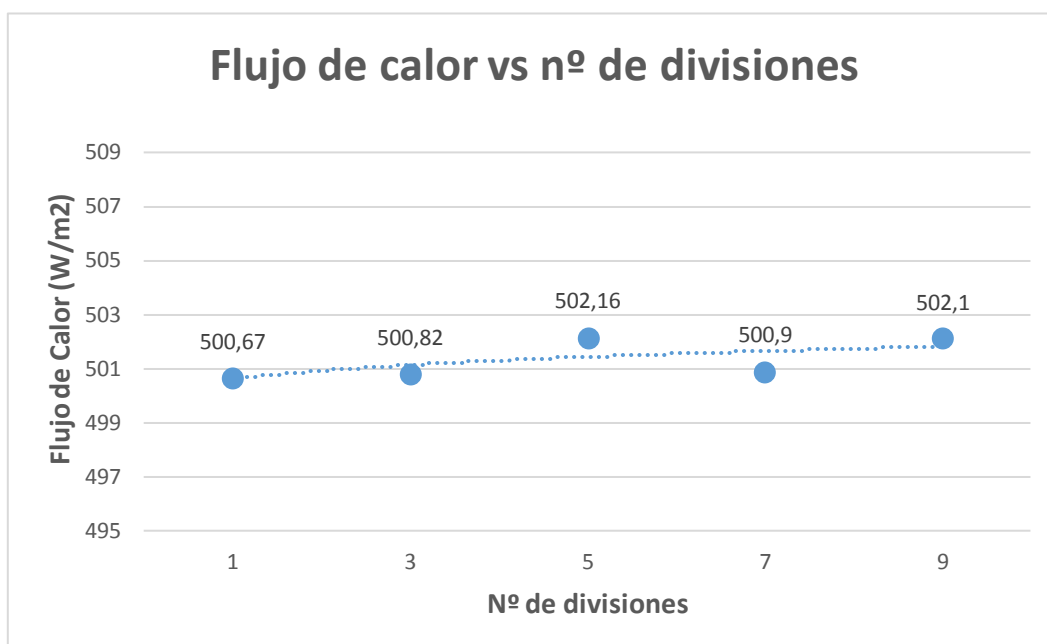


Il·lustració 38 Malla número de divisions igual a 7



Il·lustració 39 Malla número de divisions igual a 9

Una vez hemos analizado cada una de las mallas, plasmamos los datos obtenidos en una gráfica que no permitirá sacar conclusiones de una forma visual y rápida.

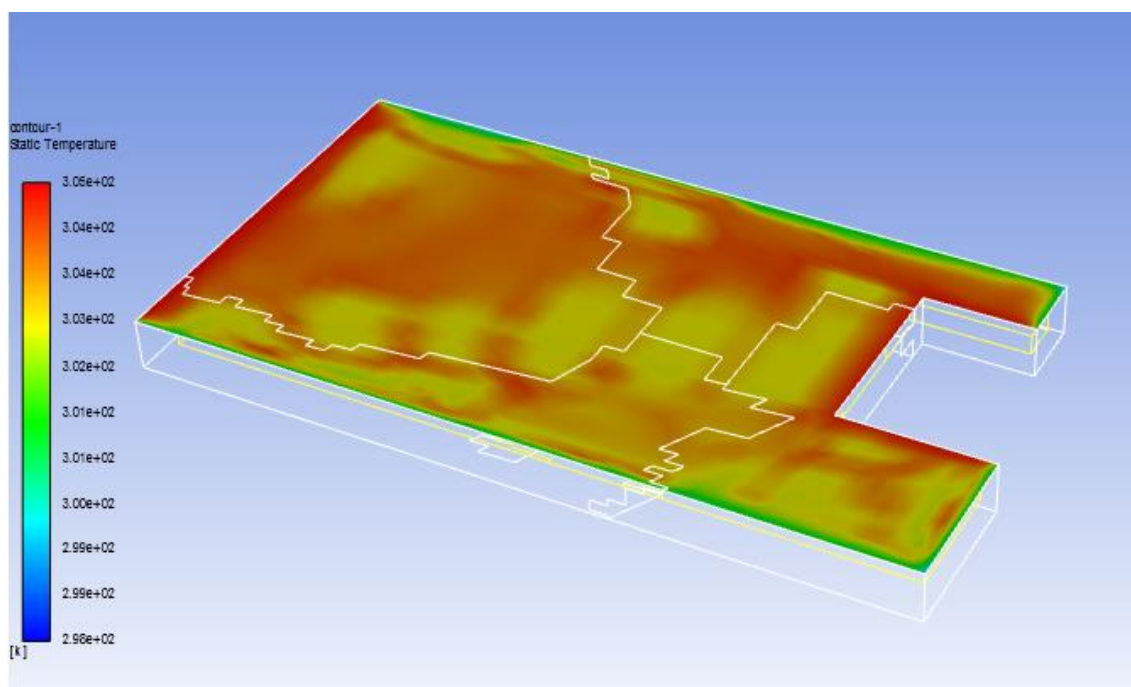


Il·lustració 40 Estudio de convergencia de la malla cámara de aire

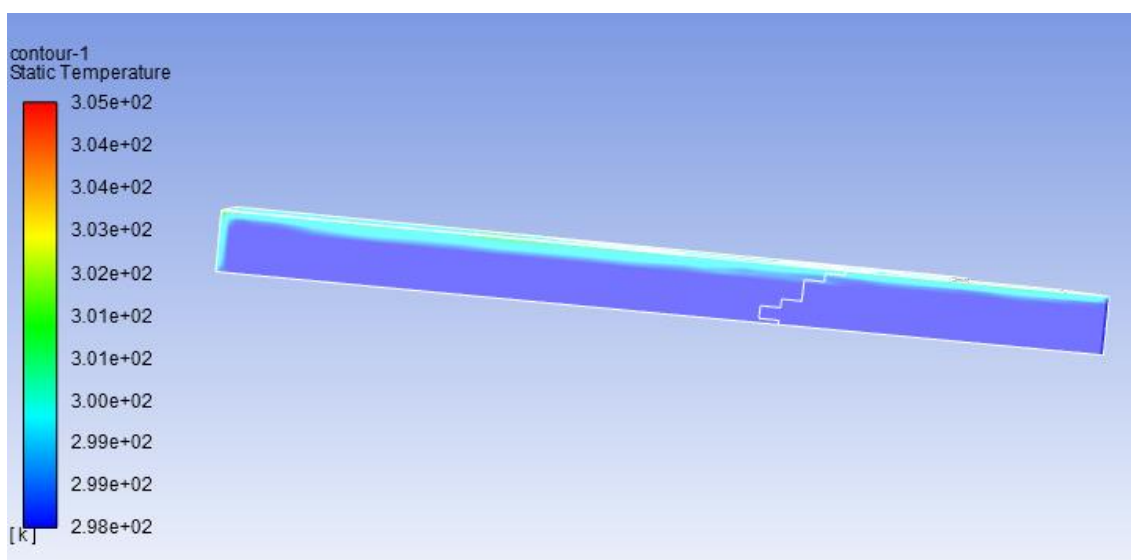
Como bien podemos comprobar la malla a partir de las 5 divisiones presenta un comportamiento repetitivo y oscilante, por lo que una malla de 5 divisiones ya será la correcta.

Una vez tenemos realizado la malla podemos observar diferentes aspectos de la simulación

Vemos cómo se comporta la temperatura en la parte del techo que está en la cubierta y que recibe el calor directo a las 13:00 h de junio



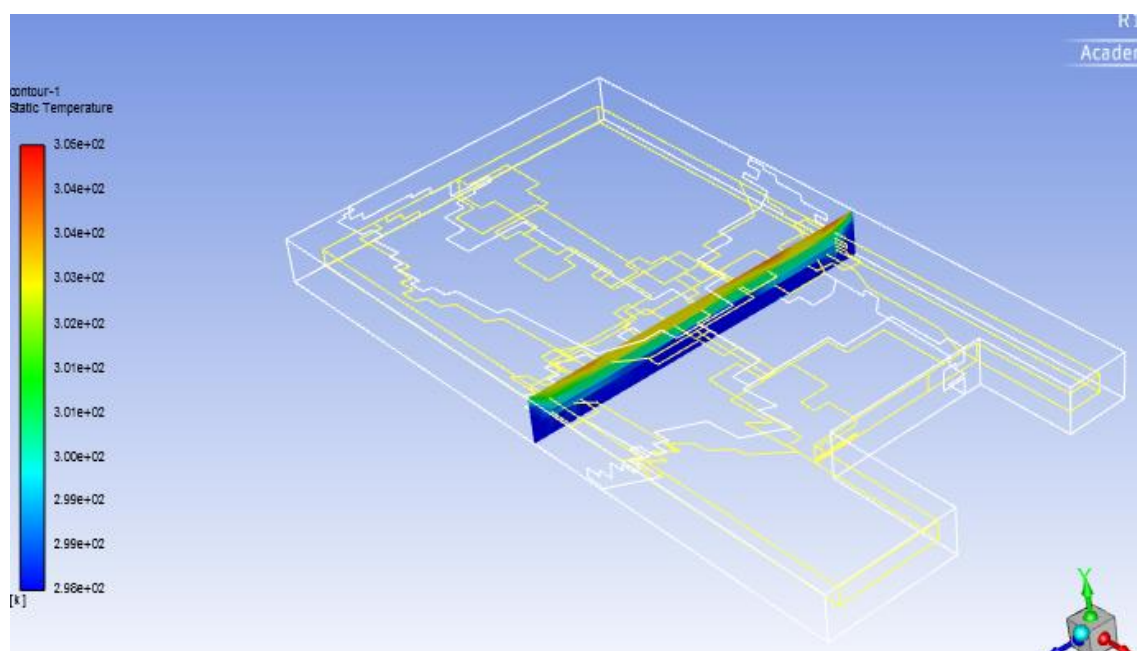
Il·lustració 41 Comportament temperatura parte superior del techo



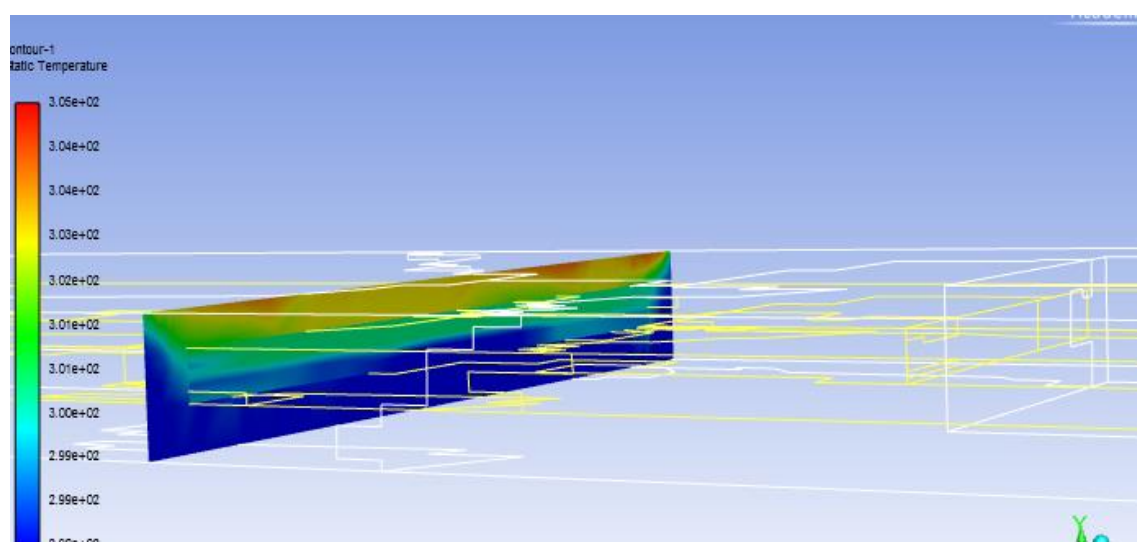
Il·lustració 42 Comportament temperatura en las medianas

Hemos creado un plano en la mitad de la cámara de aire para analizar la temperatura a lo largo de eje vertical de la cámara de aire





Il·lustració 43 Imagen plano centro cámara de aire



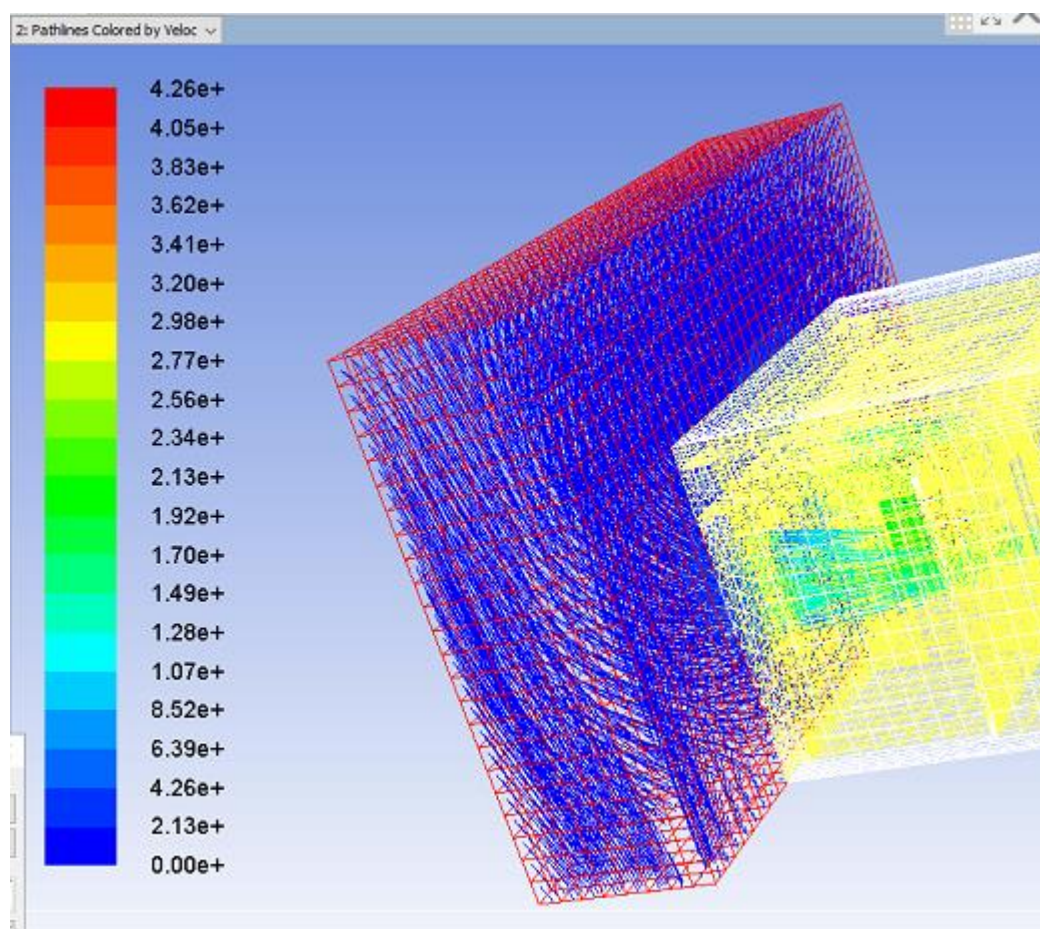
Il·lustració 44 Detalle imagen plano centro cámara de aire



## 4.2. RESULTADO ESTUDIO CONVERGENCIA DEL AIRE DE LA VIVIENDA

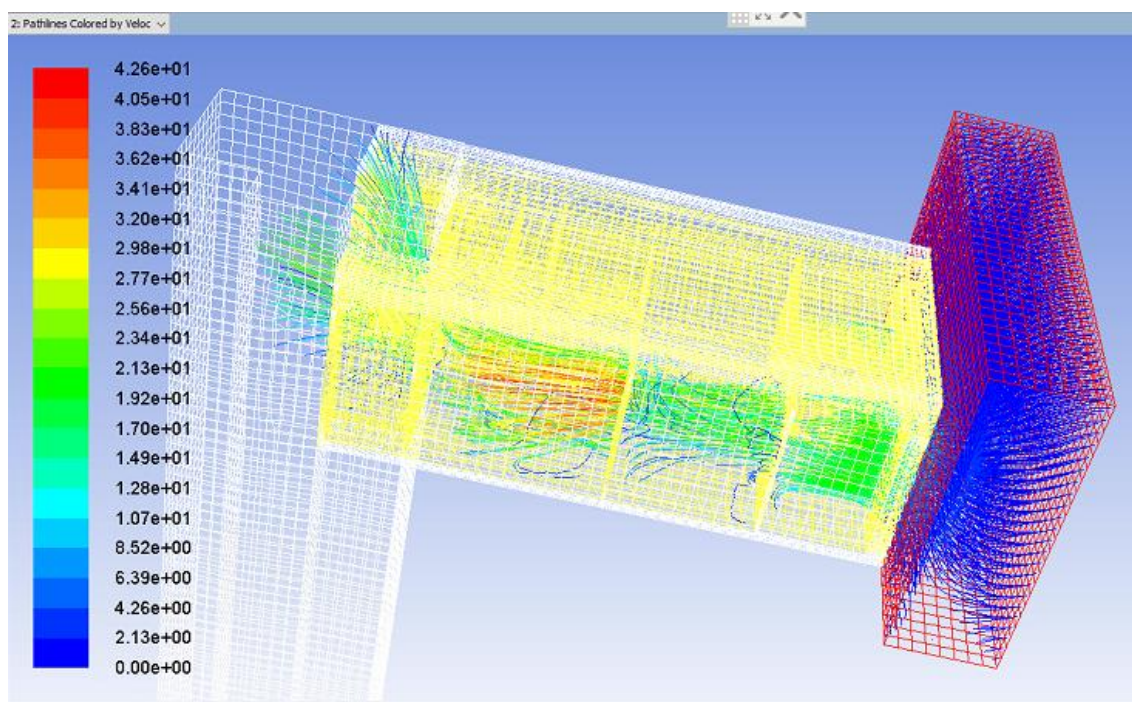
Tras arreglar todos los problemas que hemos tenido podemos ver como finalmente la simulación funciona y se muestra el flujo de aire en el interior de la vivienda, poniendo unas condiciones de contorno como si en el patio de luces hubiera una bomba que aspirara el aire y lo sacara al exterior el aire que proviene del cubo de aire de la fachada principal.

En la siguiente imagen podemos ver cómo se comporta el aire de la atmosfera que es absorbido hacia el interior de la vivienda



Il·lustració 45 Comportament del aire en la caixa atmosfèrica

Aquí podemos ver como el aire que entra por la fachada principal sale por el patio de luces tal y como hemos determinado en las pruebas de las condiciones de contorno



*Ilustración 46 Flujo de aire por el piso completo*

## 5. Análisis del impacto ambiental

Para llevar a cabo este proyecto se han emitido gases de efecto invernadero a la atmósfera. En este apartado se resume el estudio ambiental que se produce como consecuencia directa del consumo energético que se ha generado para la realización del proyecto. Se contabilizan las emisiones de  $CO_2$  generadas por el consumo eléctrico de los procesadores del ordenador personal y del ordenador externo que he podido utilizar para la realización de las simulaciones.

Solo se tiene en cuenta la emisión de  $CO_2$ , aunque existen más gases de efecto invernadero que influyen directamente en el uso de energía eléctrica.

Las emisiones relativas se han calculado a partir del factor de emisión de 0.295 Kg de  $CO_2$  eq/Kwh

	Portatil	PC Externo
Cantidad de horas (h)	300	150
Numero de procesadores	4	12
Consumo del procesador (KW)	0,075	0,2
TOTAL consumo electrico	90	360
EMISIONES RELATIVAS $CO_2$ (Kg/Kwh)	0,295	0,295
EMISIONES TOTALES UNITARIAS	26,55	106,2
EMISIONES TOTALES kg $CO_2$	132,75	

Il·lustració 47 Tabla emisiones  $CO_2$



## 6. Conclusiones

### 6.1.CONCLUSIONES A NIVEL DEL TRABAJO

Para la realización de la geometría se ha usado el programa SolidWorks, sobre el que ya se tenía un conocimiento gracias a las diversas asignaturas de Expresión Gráfica. Y que nos ha permitido obtener una representación en 3D exacta del piso de estudio, además de proporcionar las herramientas necesarias para llevar a cabo la simulación con el programa ANSYS, ya que no ha habido problemas en la realización de los inprints en varias caras de la geometría donde habían zonas de contacto y que podía producir problemas en el software de análisis. El trabajo me ha permitido conocer nuevas funcionalidades del programa como es la herramienta de grabado, que me permitió realizar los inprint o grabados en las superficies de contacto

Los resultados obtenidos en el estudio de independencia de la malla, nos lleva a pensar que para las condiciones ambientales en las que se encuentra la vivienda, la malla debe estar realizada con el método *Sweep*, el cual nos permitirá tener una malla uniforme a lo largo de toda la cámara de aire. Se ha determinado que el número de divisiones en el eje vertical de 5 divisiones ya nos aporta los resultados correctos, y es la malla que más se adecua a la simulación en vista a no realizar un gasto computacional extra cuando no resulta necesario porque el resultado ya ha convergido. En cuanto al tamaño de los elementos de la malla, dado que el flujo de calor se produce sobretudo en el eje vertical, hemos determinado que con un tamaño de elemento de 0.25 los resultados ya son suficientemente precisos. En cuanto al techo sobre el que se encuentra contenido la cámara de aire hemos determinado que el método *Hex Dominant* era el que mejor se ajustaba a las características de la malla con un tamaño de elemento de 0.25cm a lo largo del eje horizontal, y un tamaño de elemento en el eje vertical de 0.05cm, además de un *Face Meshing* para todas las caras

En lo que respecta al estudio de convergencia del aire del interior de la vivienda, tras varios intentos y rectificaciones en la simulación se ha logrado dar con una configuración que funcione, poniendo especial énfasis en las zonas de contacto entre fluidos, que son las que nos han dado mayores problemas a lo largo de la simulación. Estas zonas de contacto han tenido que pasar a ser *matching* para que el programa las leyera como interiores y no nos produjera errores a lo largo de la simulación. Se ha determinado que para las paredes interiores una parte se mallara usando el método de *Hex dominant* y la otra usando el método de *tetrahedrons* con un tamaño de malla de 0.25cm.

En cuanto a posibles mejoras en la vivienda, tras la visita a la vivienda de estudio me pareció destacable el hecho de que para que les llegará luz a la habitación principal, realizaron un tipo de ventana en la pared de la habitación para que el Sol que entraba a la habitación contigua llegará a la habitación principal.

El motivo por el que realizaron esta apertura es porque sobretodo en invierno, y debido a la falta de estanqueidad general de la vivienda, pasan la gran mayoría del tiempo en la habitación principal y para no estar siempre a oscuras hicieron esta reforma. El problema principal radica en que no tienen sistema de calefacción instalado en el piso, por lo que únicamente utilizan una calefacción eléctrica en invierno, la cual colocan en la habitación principal, al tener esta apertura, gran parte del calor que ganan conectando la calefacción lo pierden porque el calor se va a la otra habitación. Esto provoca que la energía que necesitan para calentar el espacio de la habitación sea prácticamente el doble. Se les propuso de cerrar esa apertura con un cristal, de tal manera que se pudiera seguir entrando la luz y que se minimizaran las pérdidas de calor.

La propuesta les pareció correcta y está será una de las primeras actuaciones que realizaremos estos meses en la vivienda ya que el coste y tiempo es bastante bajo, por lo que es una actuación que se realizara en breves.

## 6.2. CONCLUSIONES A NIVEL PERSONAL

A nivel personal las sensaciones han sido inmejorables, ya que con las horas que conlleva la realización del trabajo de final de grado, poder enfocarlo en un ámbito práctico ha sido gratificante para mí. El poder colaborar mínimamente en ayudar a mejorar la vida de otras personas, ya que en el fondo en esto consiste el trabajo de un ingeniero, cada día estamos solucionando problemas y este fue uno de los motivos que me llevó a estudiar este grado. La implicación personal ha llegado hasta tal punto de que ahora soy socio de Oasi Urbà y seguiré colaborando activamente con la ONG, con la que tras la entrega de este trabajo seguiré vinculado.

Otro de los motivos que me llevó también a la realización de este trabajo fue el interés que me despertaba poder aprender más sobre el manejo del software ANSYS Fluent, ya que había trabajado anteriormente con ANSYS pero no con la interface de Fluent sino con la de Mechanical, el software del cual no era tan complicado. Al tratarse de simulaciones en las que intervenían los fluidos me resultaba interesante y efectivamente puedo decir que tras la realización de este proyecto mi dominio del programa no para de mejorar, ya que día tras día vas aprendiendo cosas nuevas, funciones nuevas, etc.

El único aspecto negativo remarcable ha sido la limitación de tiempo, ya que al estar el trabajo vinculado a personas o proyectos externos, a veces no puedes marcar los tiempos y tienes que adaptarte a las circunstancias, por lo que tienes que acabar limitando el trabajo que querías hacer o realizándolo con mayor rapidez. Los límites en este proyecto estaban desde el momento en el que escogí el tema ya que cuando lo escogí aún no había arrancado el proyecto, a parte de los trámites y todo el proceso de entrevista con los vecinos y de visita de los pisos al final siempre se alarga ya que también dependes de las personas que viven en las viviendas. Esta falta de tiempo no limitará mi faena ya que seguiré ligado a la ONG.





## Presupuesto y análisis económico

Para hacer la valoración económica del estudio se han tenido en cuenta todos los factores que intervienen en cada paso, estos datos se recogen en la tabla x donde se desglosa cada factor, la cantidad de horas necesarias y el precio por hora.

La parte de Recursos Humanos engloba los costes relacionados con el personal que ha intervenido en el proyecto, que básicamente lo forman el autor del mismo y la ayuda externa recibida. Hay que tener en cuenta el coste asociado a cada fase del proceso varia. Así pues, entra en esta partida el tiempo dedicado a la recogida de información, el aprendizaje de todo el software, el pre procesamiento (geometría, mallado, condiciones de contorno,..), el post procesamiento y la redacción de toda la documentación

El ingeniero ha trabajado a una media de 5 días a la semana a razón de 6h diarias y el coste se ha calculado en base al coste de un ingeniero en prácticas que aproximadamente está en 6€/h

El precio de los diferentes software es de 0€ para DraftSight, 18.000€ la licencia de ANSYS, y 6.600€ el precio de la licencia de Solidworks Standard

El ordenador personal tiene un coste de 600€ con una vida útil de 6 años. La amortización en un año será de 100€.

El recurso del ordenador más potente es difícil de calcular, pero lo supondremos en que por cada hora y CPU implica un coste de 0.05€. Como se han utilizado 12 procesadores se puede considerar que una simulación de 1h tiene un coste de 0,6€/h. A lo largo del proyecto se han realizado multitud de simulaciones, con diferentes tiempos de cálculo, por lo que realizando una aproximación el total de horas empleadas han sido 150h. Por tanto el coste total de esta parte subirá hasta los 6€.

En cuanto al coste del ordenador externo intentaremos realizar una aproximación

RECURSOS HUMANOS	COSTE [€/H]	TIEMPO INVERTIDO[H+]	TOTAL [€]
Recogida de información	6	75	450
Aprendizaje del programa	6	150	900
Pre porceso	6	300	1800
Simulación	6	200	1200
Postproceso	6	100	600
Redaccion memoria	6	150	900
Ayuda eterna	15	50	750
<b>TOTAL</b>			
SOFTWARE	PRECIO AÑO	Nº LICENCIAS	TOTAL [€]
Draftsight	0	1	0
SolidWorks	6600	1	6600
Ansys Fluent	18000	1	18000
<b>TOTAL</b>			0
ORDENADOR	COSTE [€/AÑO]	UTILIZACIÓN[AÑOS]	TOTAL [€]
Portatil Personal	100	1	100
ORDENADOR	COSTE [€/H]	UTILIZACIÓN[H]	TOTAL [€]
Torre Externa	0,6	150	90
CONSUMO ELECTRICO	COSTE [€/kwh]	UTILIZACIÓN[H]	TOTAL [€]
Portatil Personal	0,12	300	36
<b>COSTE TOTAL (€)</b>			<b>TOTAL [€]</b>
TOTAL ANTES DE IMPUESTOS(€)			31426
I.V.A (21%)			6599,46
TOTAL DESPUES DE IMPUESTOS (€)			38025,46

Ilustración 48 Tabla presupuesto proyecto

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Martín, T. y Serrano, A., “Física Básica”, Oct 2014 [En línea]. Disponible en: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/default.htm>
- [2] “Calor y temperatura”, *Khan Academy*, 2019. [En línea] Disponible en <https://es.khanacademy.org/science/chemistry/thermodynamics-chemistry/internal-energy-sal/a/heat>
- [3] “El Calor”, *Significados [En línea]* Disponible en: <https://www.significados.com/calor/>
- [4] “Células de habitabilidad”, *GMS Arquitectura*, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.gmsarquitectura.com/>
- [5] “Aislamiento térmico del edificio”, *Asociación de ciencias ambientales* [En línea] Disponible en: <https://www.cienciasambientales.org.es/index.php>
- [6] “Sistemas pasivos para proteger tu vivienda de la radiación solar”, *Arreval ISTA*, 2016. [En línea] Disponible en: <https://www.arrevol.com/blog/5-sistemas-pasivos-para-proteger-tu-vivienda-de-la-radiacion-solar>
- [7] Fernández, R. y Carella, A. “Conservación de energía en viviendas y edificios”, *Arquinstal*, 1981. [En línea] Disponible en: [http://www.arquinstal.com.ar/eficiencia/ure\\_esso/ure.html](http://www.arquinstal.com.ar/eficiencia/ure_esso/ure.html)
- [8] “¿Qué es el aislamiento térmico?”, *Remica*, 2018. [En línea] Disponible en: <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/aislamiento-termico/>
- [9] Manteca, F., “Diseño de edificios de elevada eficiencia energética en construcción sostenible”, *Wiki EOI*, 2012. [En línea] Disponible en: [https://www.eoi.es/wiki/index.php/Dise%C3%B1o\\_de\\_edificios\\_de\\_elevada\\_eficiencia\\_energetica\\_en\\_Construcci%C3%B3n\\_sostenible](https://www.eoi.es/wiki/index.php/Dise%C3%B1o_de_edificios_de_elevada_eficiencia_energetica_en_Construcci%C3%B3n_sostenible)
- [10] Pérez, E., “Pérdidas térmicas de una edificación”, *Tecno Servicios*, 2016. [En línea] Disponible en: <http://tecnoserviciorensano.com/articulo.php?id=perdidas-termicas-de-una-edificacion>

- [11] Lleopard, O., “Consideraciones en el cálculo de cargas térmicas en viviendas: Balance de ganancias y pérdidas”, *Zigurat Global Institute of technology*, 2017. [En línea] Disponible en: <https://www.e-zigurat.com/blog/es/calculo-cargas-termicas-viviendas/>
- [12] Portillo, G., “La radiación solar”, *Metereología*, 2015 [en línea]. Disponible en: <https://www.meteorologiaenred.com/la-radiacion-solar.html>
- [13] Lorente, J. “La radiación solar”. *Portalfarma*, 2016 [en línea]. Disponible en: <https://www.portalfarma.com/Profesionales/campanaspf/categorias/Documents/MQUETACION%20MATERIAL%20FORMATIVO%20fotoproteccionfotproc2010.pdf>
- [14] Blender, M. “La transmisión del calor en edificios”. *Arquitectura & energía*, 2015 [en línea]. Disponible en: <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-transmision-del-calor/>
- [15] Araujo, R. “El edificio como intercambiador de energía”. *Tectónica*, 2009 [en línea]. Disponible en: <https://www.tectonica.archi/articles/el-edificio-como-intercambiador-de-energia>
- [16] Turégano, J. A., Hernández, M. A, & García, F. “La inercia térmica de los edificios y su incidencia en las condiciones de confort como refuerzo de los aportes solares de carácter pasivo”. *Con arquitectura*, 2013, pp 65- 80 [en línea]. Disponible en: [http://www.laslosas.es/wp-content/uploads/2015/01/inercia\\_termica.pdf](http://www.laslosas.es/wp-content/uploads/2015/01/inercia_termica.pdf)
- [17] “Guía para el cálculo de las cargas térmicas en los edificios”, *Ingiemecánica*, 2018 [en línea]. Disponible en: <https://ingiemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn255.html>
- [18] Ministerio de Fomento Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda. “*Clasificación de los vidrios según sus prestaciones frente a impacto y su forma de rotura según la norma UNE-EN 12600:2003*”, 2011 [en línea]. Disponible en: [https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadUtilizacion/DA\\_SUA\\_1\\_-\\_Clasificacixn\\_de\\_los\\_vidrios\\_a\\_impacto\\_6-2011.pdf](https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadUtilizacion/DA_SUA_1_-_Clasificacixn_de_los_vidrios_a_impacto_6-2011.pdf)

- [19] Asociación técnica española de climatización y refrigeración (ATECYR). “Guía técnica: Instalaciones de climatización con equipos autónomos” en *Ahorro y eficiencia energética en climatización*. Madrid: IDAE, 2012.
- [20] La radiación solar. Energía solar, 2017 [en línea]. Disponible en: <https://solar-energia.net/definiciones/radiacion-solar.html>
- [21] Y. A. Çengel i M. A. Boles, *Termodinámica*. México: Mc Graw Hil Interamericana, 2012.
- [22] Y. A. Çengel. *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. México: Mc Graw Hill interamericana, 2007.

## LESGISLACIÓN Y DISPOSICIONES GENERALES

- [23] Reglamento de la certificación de la eficiencia energética de los edificios. Decreto de 5 de abril de 2013. RCL. 235/2013
- [24] Reglamento relativa a la eficiencia energética de los edificios. Decreto de 16 de diciembre del 2002. Directiva 2002/91 CE del parlamento europeo y del consejo.
- [25] Reglamento relativa a la eficiencia energética de los edificios (Refundición). Decreto de 19 de mayo del 2010. Directiva 2010/31/UE del parlamento europeo y del consejo.
- [26] Reglamento en el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. Decreto de 31 de enero del 2007. RCL. 47/2007
- [27] Reglamento en el que se modifica RD 314/2006 de 17 de marzo por el que se aprueba el código técnico de la edificación versión para trámite de audiencia e información pública. *Documento Básico HE Ahorro de Energía junio 2018*.
- [28] Reglamento del Código Técnico de la Edificación. Decreto de 17 marzo del 2006. RCL. 314/2006.
- [29] *Reglamento del Documento Básico HS Salubridad junio del 2017*.
- [30] Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Decreto de 20 de julio del 2007. RCL 1027/2007.

[31] Código técnico de la Edificación. Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía. *Puentes Térmicos, DA DB-HE/3*, Enero del 2014.

[32] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo .

